

Daniel Martins Plucenio

**CARACTERIZAÇÃO DE ROCHAS RESERVATÓRIO DE
PETRÓLEO A PARTIR DA MODELAGEM DO SISTEMA
POROSO EM REDE DE POROS**

Dissertação submetida ao Programa de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Clovis Maliska

Coorientador: Prof. Dr. Celso P.
Fernandes

Florianópolis

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Plucenio, Daniel Martins

CARACTERIZAÇÃO DE ROCHAS RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO A PARTIR DA MODELAGEM DO SISTEMA POROSO EM REDE DE POROS / Daniel Martins Plucenio ; orientador, Clovis Maliska ; coorientador, Celso Peres Fernandes. - Florianópolis, SC, 2016.

143 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação Multidisciplinar em Saúde.

Inclui referências

1. Saúde. 2. Caracterização de reservatórios. 3. Análise de imagens. 4. Rocha digital. 5. Rede de poros e ligações. I. Maliska, Clovis . II. Fernandes, Celso Peres. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação Multidisciplinar em Saúde. IV. Título.

Daniel Martins Plucenio

**CARACTERIZAÇÃO DE ROCHAS RESERVATÓRIO DE
PETRÓLEO A PARTIR DA MODELAGEM DO SISTEMA
POROSO EM REDE DE POROS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 22 de Janeiro de 2016.

Prof. Jonny Carlos da Silva., Dr. Eng
Coordenador do Curso

Prof. Clovis R. Maliska, PhD. – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Celso Peres Fernandes, Dr.– Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Antônio Fábio Carvalho da Silva, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. José Atonio Bellini da Cunha Neto, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Amir Antonio Martins Oliveira Jr., Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de aproveitar este espaço para agradecer aos meus professores orientadores Maliska e Celso Fernandes por todo o conhecimento dividido durante o mestrado e no desenvolvimento desta dissertação.

Um agradecimento especial aos pesquisadores Iara Mantovani e Anderson Moreira, responsáveis pela aquisição das imagens utilizadas neste trabalho e a banca examinadora pelas correções e sugestões ao texto.

À minha família (de sangue e coração): obrigado pelo amor infinito.

RESUMO

Os métodos de análise de imagem vêm se tornando um poderoso aliado na caracterização de rochas reservatórios, com vantagens como uniformidade e repetitividade das análises assim como redução em tempo e custos de operação. A partir de uma imagem tridimensional, propriedades petrofísicas podem ser estimadas utilizando um modelo matemático que capture a física do escoamento de fluidos no interior do meio poroso. Este trabalho utiliza uma metodologia chamada de “extração de rede de poros e ligações”, o que essencialmente consiste em criar uma estrutura topologicamente equivalente ao meio poroso original, mas com uma geometria simplificada e conhecida. Esta transformação é realizada de modo a imitar a natureza das estruturas porosas, que contém espaços maiores entre a matriz sólida, compondo as estruturas chamadas de poros na rede, e aberturas alongadas conectando dois ou mais poros, chamadas de ligações ou gargantas. A vantagem deste método é utilizar a geometria simplificada dos elementos da rede para expressar a vazão de um poro a outro através da equação generalizada de Poiseuille para escoamento no interior de dutos prismáticos. Com o emprego destas expressões na conservação de massa, é formado um sistema linear de equações para pressão em cada poro. Esta abordagem necessita, portanto, de menos recursos computacionais que as alternativas existentes (e.g. método Lattice Boltzmann). Possibilitando análises mais rápidas e a caracterização de volumes maiores de dados que seriam proibitivos com o uso de outros métodos. Neste trabalho são apresentadas de forma detalhada todas as etapas do processo de extração da rede a partir de uma imagem tridimensional binarizada. Redes de poros e ligações são extraídas a partir de imagens de arenitos, e utilizadas para calcular porosidade, permeabilidade absoluta e pressão capilar por intrusão de mercúrio, apresentando boa concordância com dados experimentais.

Palavras-chave: Caracterização de reservatórios. Análise de imagens. Rocha digital. Rede de poros e ligações. Esferas máximas

ABSTRACT

Methods based on image analysis are proving to be a powerful ally for reservoir rock characterization with advantages such as analysis uniformity and repeatability as well as reduction of operational costs and time. Once a three-dimensional image is obtained, petrophysical properties can be estimated using a mathematical model that captures the physics of fluid flow through porous media. This work uses the Pore network extraction methodology, which in essence consists in creating a topologically equivalent structure of the porous system but with a simplified geometry, trying to mimic the rock in its nature, which contains larger spaces between grains (pores) and elongated apertures connecting two or more pores (throats).

The main advantage of this method is to make use of the simplified geometry of the network elements to express flow between pores using generalized Poiseuille equation for flow inside prismatic ducts. Applying these expressions in mass conservation equation, a linear equation system is formed for pressure on each pore. This approach requires less computational resources than the existing numeric alternatives (e.g. Lattice Boltzmann method), therefore obtaining faster responses and allowing larger image analysis which would be prohibitive when using other methods. An in-depth description of the complete process of network extraction from three dimensional binarized images is presented. Pore networks are extracted from siliciclastic rock samples, and used to calculate porosity, absolute permeability and capillary pressure curve for mercury intrusion, showing good accordance with experimental data.

Keywords: Reservoir characterization. Image analysis. Digital rock. Pore network. Maximal spheres

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representação de uma seção de um meio poroso	29
Figura 2 Meio poroso contendo dois fluidos em seu interior: Água e óleo	30
Figura 3 Esquema das forças de atração das moléculas no interior de um fluido e na interface com outro fluido menos denso.	32
Figura 4 Esquema do sistema de forças existentes em um elemento de interface de dois fluidos imiscíveis. Adaptação de Rosa (2006)	32
Figura 5 Equilíbrio de forças existentes na interface de fluidos molhante e não-molhante sobre uma superfície sólida	33
Figura 6 Representação de um tubo capilar e a ascensão do fluido mais denso, neste caso molhante	34
Figura 7 Comportamento típico de curvas de pressão capilar para drenagem e embebição	37
Figura 8 Representação da saturação irreduzível de fluido molhante em um processo de drenagem	37
Figura 9 Representação da saturação residual de fluido não molhante em um processo de embebição	38
Figura 10 Comparação entre imagens de tomografia de raios X e reconstrução estatística multi-pontos de Okabe e Blunt (2004, 2005) ..	40
Figura 11 Comparação entre imagens de tomografia de raios X e construção da imagem por método de processos (Øren e Bakke 2002)	41
Figura 12 Representação das etapas envolvidas em uma tomografia de raios X (Silva 2012)	42
Figura 13 Rede de poros e ligações gerada no trabalho de Øren (2002, 2003)	44
Figura 14 Extração da rede de poros por meio de algoritmos de eixo médio (Scheda e others 2004)	45
Figura 15 Problemas do método baseado em eixo médio e sua sensibilidade à irregularidades na superfícies das imagens (Silin e Patzek 2006)	46

Figura 16 (a) imagem tridimensional binarizada de um meio poroso. (b) representação através de esferas máximas (Silin e Patzek 2006).....	47
Figura 17 Representações do processo de extração da rede: (a) Amostra original (b) Imagem adquirida através do tomógrafo em tons de cinza, com uma determinada resolução (c) Binarização da imagem (d) Busca de esferas inscritas (e) Busca das esferas máximas (f) Clustering (g) Expansão de gargantas (h) Geração da rede	50
Figura 18 Representação de esferas discretas no domínio bidimensional	51
Figura 19 Representação de esferas discretas no domínio tridimensional	52
Figura 20 Demonstração dos dois valores de raio para uma esfera discreta, utilizado por Dong (Dong 2008).....	53
Figura 21 Resultado esperado da busca por esferas inscritas em um caso bidimensional	54
Figura 22 Esferas inscritas no exemplo fornecido pela Figura 21 dispostas lado a lado	54
Figura 23 Técnica de “inflagem” de esferas para a busca de esferas inscritas (Dong 2008).....	55
Figura 24 Pseudo-código para a etapa de inicialização do cálculo de SEDT (<i>Squared Euclidean Distance Transformation</i>)	56
Figura 25 Etapa de inicialização para cálculo de <i>SEDT</i> (<i>Squared Euclidean Distance Transformation</i>). Imagem binarizada (a), o resultado obtido após o <i>forward scan</i> (b) e <i>backward scan</i> (c)	56
Figura 26 Conjunto de parábolas geradas para a coluna 4, destacando o envelope superior e a coluna 4 resultante após a transformação.....	57
Figura 27 Conjunto de parábolas geradas para a coluna 9, destacando o envelope superior e a coluna 9 resultante após a transformação.....	58
Figura 28 Resultado esperado da busca por esferas máximas em um caso bidimensional	59
Figura 29 Esferas máximas encontradas no exemplo fornecido pela dispostas lado a lado	59

Figura 30 Exemplo onde a esfera B não é identificada como inclusão através da metodologia utilizada por Dong (Dong 2008) e Al-Kharusi (2007).....	60
Figura 31 Esfera discreta de $R_{max2} = 1$ e $R_{min2} = 0$ com o centro afastado em um voxel de uma esfera de $R_{max2} = 2$ e $R_{min2} = 1$	60
Figura 32 Esfera discreta com $R_{max2} = 9$ inclusa em uma esfera discreta de $R_{max2} = 14$	61
Figura 33 Em um domínio contínuo não se verifica a inclusão de uma esfera de raio 9 em uma de 14	61
Figura 34 Envelope superior formado pelos paraboloides propostos por Saito e Toriwaki (1994) a partir exemplo da Figura 30	62
Figura 35 Reconstrução da imagem a partir de um conjunto de esferas máximas	64
Figura 36 Parábolas formadas pelo algoritmo de REDT para reconstrução da imagem original	64
Figura 37 RDMA aplicado em um caso bidimensional com uma esfera de $R_{max2} = 2$ e quatro esferas de $R_{max2} = 1$ com centros afastados em um voxel.....	65
Figura 38 Demonstração da determinação dos limites das esferas discretas pelo RDMA para o exemplo da Figura 31	66
Figura 39 Demonstração da determinação dos limites das esferas discretas pelo RDMA para o exemplo da Figura 32	66
Figura 40 À esquerda a representação de um espaço poroso pelos <i>voxels</i> vazios e à direita as sete esferas máximas discretas encontradas pelo método (apresentadas cada uma com uma cor diferente).....	67
Figura 41 Representação da etapa de <i>Clustering</i> : São estabelecidas relações de "parentesco" a partir das duas esferas ancestrais e se encontra uma garganta	68
Figura 42 Representação dos <i>voxels</i> na etapa de <i>Clustering</i> . Ao fim desta etapa temos três esferas pertencentes ao poro 1, três esferas pertencentes ao poro 2 e uma esfera identificada como garganta	69
Figura 43 Representação de expansão de uma garganta	70

Figura 44 Representação dos voxels na etapa de expansão das gargantas. Por fim, duas esferas máximas irão compor o poro 1, enquanto uma esfera compõe o poro 2 e quatro esferas definem a garganta entre os dois poros.....	71
Figura 45 Rede final com estruturas porosas aproximadas para elementos geométricos mais simples (esferas para poros e cilindros para as ligações).....	72
Figura 46 Extração de um conjunto poro-garganta-poro encontrado em um caso real	72
Figura 47 Extração de uma rede de poros e ligações de uma imagem binarizada de 100^3 voxels utilizando o algoritmo apresentado neste trabalho	73
Figura 48 Representação da utilização de um Spatial Hash para encontrar as esferas adjacentes à esfera SA.....	74
Figura 49 Comparação da rede gerada utilizando a metodologia de Dong (à esquerda) e Al-Kharusi (à direita) para o cálculo de raio dos poros e ligações	75
Figura 50 Representação da identificação dos poros de fronteira de uma rede.....	76
Figura 51 Aproximação da estrutura porosa original por elemento prismático cuja seção possua um fator de forma semelhante ao original	83
Figura 52 Estrutura porosa original de um sistema poro-garganta-poro e sua aproximação para elementos prismáticos	86
Figura 53 Exemplo de uma pequena rede para montagem do sistema de equações de pressões nos poros	88
Figura 54 Representação da intrusão de mercúrio em uma rede com aumento gradativo da pressão de fase líquida do mercúrio	92
Figura 55 Plugue da amostra BS e as sub-amostras retiradas para aquisição das imagens por tomografia. Material cedido pelo LMPT....	94
Figura 56 Seções transversais em tons de cinza das imagens adquiridas de cada amostra.....	95
Figura 57 Seções binarizadas das regiões de interesse das amostras. Todos os volumes são cúbicos com 500 voxels em cada direção. É	

apresentada a medida de comprimento de cada amostra (a) BS, (b) BBS, (c) GBS, (d) IBS e (e) IGS	97
Figura 58 Definição do volume elementar representativo (Bear 1972)	98
Figura 59 Distribuição de valores de porosidade para sub amostras de 50^3 à 500^3 voxels para a amostra BS	98
Figura 60 Distribuição de valores de porosidade para sub amostras de 50^3 à 500^3 voxels para a amostra BBS	99
Figura 61 Distribuição de valores de porosidade para sub amostras de 50^3 à 500^3 voxels para a amostra GBS	99
Figura 62 Distribuição de valores de porosidade para sub amostras de 50^3 à 500^3 voxels para a amostra IBS	100
Figura 63 Distribuição de valores de porosidade para sub amostras de 50^3 à 500^3 voxels para a amostra IGS	100
Figura 64 Função correlação para a amostra BS	102
Figura 65 Função correlação para a amostra BBS	103
Figura 66 Função correlação para a amostra GBS	103
Figura 67 Função correlação para a amostra IBS	104
Figura 68 Função correlação para a amostra IGS	104
Figura 69 Inspeção da rede de uma porção menor (200^3 voxels) da imagem da amostra BS	105
Figura 70 Visualização da rede extraída para a amostra BS, os poros são representados com cores variando do azul ao vermelho de acordo com seu tamanho	106
Figura 71 Sequência do peneiramento realizado com pela distribuição e tamanho de poros por morfologia matemática.	108
Figura 72 Distribuição de tamanho de poros do exemplo da Figura 71 utilizando a técnica de morfologia matemática.	108
Figura 73 Espaço poroso do exemplo da Figura 71 segmentado em poros e ligações	109
Figura 74 Distribuição do tamanho de poros utilizando morfologia matemática e rede de poros e ligações para a amostra BS	110

Figura 75 Distribuição do tamanho de poros utilizando morfologia matemática e rede de poros e ligações para a amostra BBS	110
Figura 76 Distribuição do tamanho de poros utilizando morfologia matemática e rede de poros e ligações para a amostra GBS	111
Figura 77 Distribuição do tamanho de poros utilizando morfologia matemática e rede de poros e ligações para a amostra IBS.....	111
Figura 78 Distribuição do tamanho de poros utilizando morfologia matemática e rede de poros e ligações para a amostra IGS	112
Figura 79 Representação dos plugues retirados do testemunho de onde foram realizadas medidas das propriedades em laboratório (azul) e adquiridas imagens (rosa)	113
Figura 80 Distribuição de tamanho de poros em base volumétrica da amostra BS	113
Figura 81 Distribuição de tamanho de poros em base volumétrica da amostra BBS	114
Figura 82 Distribuição de tamanho de poros em base volumétrica da amostra GBS	114
Figura 83 Distribuição de tamanho de poros em base volumétrica da amostra IBS.....	115
Figura 84 Distribuição de tamanho de poros em base volumétrica da amostra IGS	115
Figura 85 Permeabilidade média calculada através das redes e as medida em laboratório (plugues mais próximos da região d e onde foi adquirida a imagem)	119
Figura 86 Curvas de pressão capilar para intrusão de mercúrio com dados experimentais e por métodos de análise de imagens para a amostra BS.....	120
Figura 87 Curvas de pressão capilar para intrusão de mercúrio com dados experimentais e por métodos de análise de imagens para a amostra BBS	120
Figura 88 Curvas de pressão capilar para intrusão de mercúrio com dados experimentais e por métodos de análise de imagens para a amostra GBS.....	121

Figura 89 Curvas de pressão capilar para intrusão de mercúrio com dados experimentais e por métodos de análise de imagens para a amostra IBS.....	121
Figura 90 Curvas de pressão capilar para intrusão de mercúrio com dados experimentais e por métodos de análise de imagens para a amostra IGS.....	122
Figura 91 Elemento prismático da rede contendo dois fluidos imiscíveis em seu interior num processo de drenagem	126
Figura 92 Representação da geração de rede multiescalar (Kronbauer 2014)	129
Figura 93 Máscaras de chanfro associadas às métricas d_4 e d_8 (Fernandes 2002).....	138
Figura 94 Bolas de raio $r = 2$ para diferentes métricas, no domínio bidimensional (Fernandes 2002).....	138
Figura 95 Formato que as bolas adquirem para um raio grande (Fernandes 2002).....	139
Figura 96 Bolas de raio $r = 1, 2$ e 3 , para a métrica d_{3-4-5} , no domínio tridimensional (Moreira 2013).	139
Figura 97 Princípio da operação de erosão. a) Imagem original X e, b) o seu respectivo erodido $E^B(X)$. Detalhe do elemento estruturante (Fernandes 2002).....	140
Figura 98 Esquema ilustrativo da operação de dilatação. a) Imagem original X e, b) o seu respectivo dilatado $D^B(X)$. Detalhe do elemento estruturante [Fernandes, 2002].	141
Figura 99 Representação das duas operações morfológicas que resultam na operação de abertura (Fernandes 2002).	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Fatores de forma para as formas geométricas a serem utilizados pelos elementos da rede.....	82
Tabela 2 Denominação das amostras a serem caracterizadas de acordo com sua origem	93
Tabela 3 Resolução utilizada na tomografia de cada amostra	96
Tabela 4 Porosidade das amostras medidas experimentalmente	116
Tabela 5 Porosidade total e efetiva das amostras através da análise de imagens	117
Tabela 6 Permeabilidade absoluta das amostras medidas em laboratório com a correção de Klinkenberg de acordo com sua posição no testemunho	118
Tabela 7 Permeabilidade absoluta das amostras para cada direção cartesiana e seu valor médio.....	118
Tabela 8 Resumo dos resultados obtidos com o método de redes de poros e ligações	123

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Porosidade
ϕ_e	Porosidade efetiva
ϕ_r	Porosidade residual
S	Saturação, esfera
V	Volume
V_P	Volume poroso
V_S	Volume da matriz sólida
V_f	Volume ocupado por determinado fluido
A	Área
L	Comprimento
K	Permeabilidade absoluta
μ	Viscosidade
P	Pressão, perímetro
P_c	Pressão capilar
F_c	Força capilar
σ	Tensão interfacial
θ	Ângulo de contato
ρ	Densidade
g	Aceleração da gravidade
r	Raio
I	Intensidade de radiação
λ	Coefficiente de atenuação
C	Centro de uma esfera
R	Raio de uma esfera
E_f	Fator de expansão
G	Fator de forma
A_s	Área superficial de um elemento da rede
v	Velocidade
Q	Vazão volumétrica
γ	Condutância hidráulica
μ	Viscosidade dinâmica
Ω	Resistência hidráulica
Z	Função de fase
$C_{\mathfrak{Z}}$	Função correlação
i, j, k	Índices em imagens tridimensionais

x, y, z	Coordenadas cartesianas
-----------	-------------------------

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
1.1	Objetivo	27
1.1.1	Objetivos específicos:.....	27
1.2	Rochas, reservatórios e propriedades petrofísicas	28
1.2.1	Porosidade	28
1.2.2	Saturação	29
1.2.3	Permeabilidade absoluta	30
1.2.4	Pressão Capilar	31
1.3	Caracterização de reservatórios por análise de imagens	38
1.3.1	Obtenção de imagens tridimensionais.....	39
1.3.2	Binarização da Imagem	43
1.3.3	Determinação de Propriedades Petrofísicas	43
1.3.4	Rede de poros e ligações.....	44
2	EXTRAÇÃO DA REDE DE POROS E LIGAÇÕES	49
2.1	Etapas de construção da rede	49
2.2	Busca de esferas inscritas	50
2.2.1	Esferas discretas	51
2.2.2	Algoritmo para inflar esferas.....	54
2.2.3	Transformada de distâncias euclidianas	55
2.3	Remoção de inclusões (busca das esferas máximas)	58
2.3.1	Teste de Inclusão de Esferas em Domínio Contínuo	58
2.3.2	Extração de Esferas Máximas com Parabolóides Elípticas	62
2.3.3	Transformada de distância euclidiana reversa (REDT - Reverse euclidian distance transformation)	63
2.3.4	RDMA (<i>Reduced Discrete Medial Axis Extraction</i>).....	64

2.4	Aglomeraco (<i>Clustering</i>).....	66
2.4.1	Algoritmo de Clustering.....	68
2.5	Expansão de gargantas	70
2.6	<i>Spatial Hash</i> (Mapa espacial)	73
2.7	Parâmetros geométricos e topológicos da rede de poros e ligações	74
2.7.1	Raio dos Poros e Gargantas	74
2.7.2	Volume	75
2.7.3	rea Superficial	76
2.7.4	Poros de Fronteira	76
3	PROPRIEDADES PETROFÍSICAS	79
3.1	Propriedades estticas e descrição morfológica da amostra	79
3.1.1	Porosidade absoluta	79
3.1.2	Porosidade efetiva.....	79
3.2	Propriedades petrofísicas de transporte.....	80
3.3	Geometria da rede e o conceito de fator de forma	80
3.4	Conservação da massa	84
3.5	Equação da vazão em um sistema poro-ligação-poro	84
3.6	Sistema de equações para pressão nos poros	87
3.7	Exemplo	87
3.8	Permeabilidade absoluta	89
3.9	Curva de pressão capilar	90
4	CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS: MATERIAIS E METODOLOGIA	93
4.1	Amostras	93
4.2	Microtomografia	94
4.3	Processamento das imagens	96
4.3.1	Volume elementar representativo	97
4.3.2	Função correlação	100

4.4	Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)	102
5	RESULTADOS	105
5.1	Inspeção visual da rede	105
5.2	Descrição do espaço poroso	106
5.2.1	Distribuição de tamanho de poros	107
5.2.2	Número de coordenação	112
5.2.3	Comparação dos resultados com dados medidos em laboratório	112
5.3	Porosidade total e efetiva	116
5.4	Permeabilidade absoluta	117
5.5	Curvas de pressão capilar	119
6	CONCLUSÕES	125
6.1	Objetivos futuros	125
6.1.1	Escoamento multi-fásico	125
6.2	Redes multi-escalas	127
6.2.1	Redes estocásticas	127
6.2.2	Procedimento para construção da rede multiescalar	128
	REFERÊNCIAS	131
	APÊNDICE: MORFOLOGIA MATEMÁTICA	137

1 INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Objetivo

O presente trabalho trata da caracterização do sistema poroso e da predição por modelagem numérica de propriedades petrofísicas de rochas reservatório de petróleo a partir de imagens 3-D adquiridas com microtomografia computadorizada de raios-X. A escala espacial de análise é a do chamado “*core plug*”, amostras, em geral cilíndricas (com diâmetro típico de cerca de 2,5 cm) retiradas de testemunhos do reservatório. Assim, este trabalho tem como objetivo geral o estudo de técnicas de cálculo de propriedades petrofísicas por meio de análise de imagens. Para tanto, utiliza-se uma representação do sistema poroso em rede de poros e ligações, possibilitando a simulação numérica do escoamento monofásico através do meio poroso e a determinação da permeabilidade absoluta. Também, simulam-se processos de deslocamento de fluidos, na condição de equilíbrio mecânico, de forma a se obter curvas de pressão capilar.

1.1.1 Objetivos específicos:

- Desenvolvimento e implementação de um código computacional que realize a extração de redes de poros e ligações a partir de imagens tridimensionais, utilizando o método de esferas máximas.
- Desenvolvimento e implementação de código computacional para a determinação de curvas de pressão capilar e permeabilidade absoluta, por meio da simulação de escoamento de fluidos através da rede
- Validação e interpretação dos resultados obtidos com os códigos computacionais. Comparação com dados de laboratório. O método será aplicado em amostras de arenitos.

Os termos aqui utilizados serão explicados neste capítulo, onde serão apresentados também o caminho e a correspondente revisão bibliográfica para que estes objetivos possam ser alcançados.

1.2 Rochas, reservatórios e propriedades petrofísicas

Um reservatório de petróleo é como são denominadas as rochas porosas e permeáveis que contenham em seu espaço vazio uma quantia de interesse comercial de hidrocarbonetos. Estas rochas reservatórios são compostas por uma matriz sólida e uma rede de poros interconectados originados em razão de processos de deposição, diagênese e fraturamento (agindo de forma individual ou conjunta) (Ahr 2011).

A caracterização de reservatórios consiste na representação destes sistemas porosos e seu comportamento através de determinadas grandezas, denominadas de propriedades petrofísicas. Esta caracterização é de grande validade para a indústria, uma vez que possibilita, por exemplo, realizar uma estimativa do volume de hidrocarbonetos existentes, determinar as melhores localidades para perfuração de poços, antecipar o comportamento do reservatório ao longo de sua exploração, prever o transporte de fluidos injetados em recuperações secundárias e otimizar a extração dos recursos existentes. As seções seguintes trazem as definições de algumas destas propriedades.

1.2.1 Porosidade

A porosidade (ϕ) é a razão entre o volume dos poros (V_P) existentes na rocha e o volume total ocupado por ela (V). É uma propriedade importante pois é uma medida do potencial de armazenamento de hidrocarbonetos no meio poroso. Pode ser expressa pela fração:

$$\phi = \frac{V_P}{V} = \frac{V_P}{V_P + V_S}, \quad 1.1$$

sendo que V_S representa o volume ocupado pela matriz sólida da rocha. A esta propriedade também é atribuído o nome de **porosidade absoluta**, pois leva em conta todos os poros da rocha. Já a **porosidade efetiva** ϕ_e é definida como a razão entre o volume dos poros interconectados e o volume total, excluindo-se o volume dos poros que estão isolados. Por tratar apenas do espaço ocupado por fluidos que podem ser deslocados, esta propriedade é mais interessante para a caracterização quando se pensa na produção do reservatório. A porosidade não-conectada é chamada de **porosidade residual** ϕ_r , sendo

que desta forma a porosidade absoluta pode ser escrita como $\phi = \phi_e + \phi_r$.

A porosidade pode ainda ser classificada como **porosidade primária** e **porosidade secundária**. A primária é a porosidade originada nos processos de deposição e sedimentação, onde os fatores determinantes são o tamanho e formato dos grãos e a forma como é dado seu empacotamento (Chicourel 1959; Mantovani 2013). A porosidade secundária é resultante da ação de processos geológicos que ocorrem após a sedimentação, como compactação, cimentação, formação de pequenas cavidades (vugs), fraturas e dissolução.

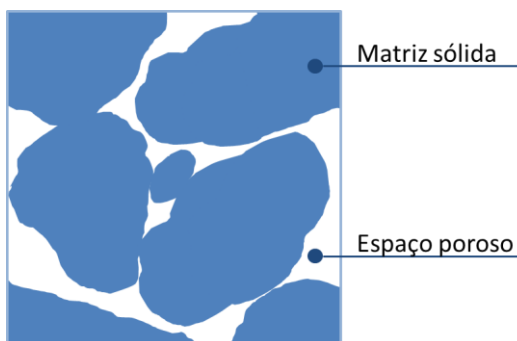


Figura 1 Representação de uma seção de um meio poroso

1.2.2 Saturação

Uma rocha reservatório está normalmente preenchida com um ou mais fluidos em seu interior. O conhecimento do conteúdo dos poros tem grande importância para a determinação do valor econômico de um reservatório. A saturação (S) é definida como a fração do volume dos poros ocupada por um determinado fluido. Considerando V_f como o volume de um determinado fluido, pode-se escrever a sua saturação como:

$$S_f = \frac{V_f}{V_p} . \quad 1.2$$

Quando um meio poroso contém apenas um fluido ocupando todo o volume poroso, sua saturação será de 100%. Assume-se que um reservatório de petróleo estava inicialmente preenchido por água, antes

da migração do óleo. Sendo assim, as zonas que contém hidrocarbonetos conterão sempre dois ou mais fluidos. A saturação de água contida nestas regiões é chamada de saturação de água inicial ou conata.

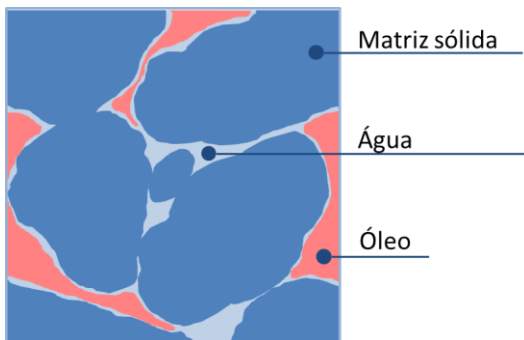


Figura 2 Meio poroso contendo dois fluidos em seu interior: Água e óleo

1.2.3 Permeabilidade absoluta

A permeabilidade é a propriedade petrofísica que está relacionada à capacidade com que um fluido pode ser transportado através do meio poroso. Portanto é fundamental para que se possa estimar a produção e comportamento de um determinado reservatório. A permeabilidade é conhecida como absoluta quando um único fluido preenche e escoar pelo espaço poroso e é uma propriedade intrínseca da rocha, dependente da geometria e conectividade do espaço poroso e independente do fluido saturante. Em 1856, o engenheiro francês Henry Darcy propôs uma relação empírica para a vazão de um fluido através de um meio poroso dada por:

$$Q = k \frac{A \Delta P}{L}, \quad 1.3$$

onde A e L são a área da seção e o comprimento do meio poroso e ΔP é a diferença de pressão entre as duas extremidades onde ocorre o escoamento. O termo k foi chamado de condutividade hidráulica e representa a relação linear entre a vazão e a diferença de pressão em um meio poroso. A condutividade hidráulica é uma grandeza que depende do fluido em questão. Com o intuito de tornar uma propriedade intrínseca do meio poroso Nutting (1930) propôs que (Cunha 2012):

$$k = \frac{K}{\mu} \quad 1.4$$

onde K é chamada de permeabilidade absoluta (ou permeabilidade intrínseca) e μ é a viscosidade do fluido. Assim a equação 1.3 pode ser reescrita como:

$$Q = K \frac{A \Delta P}{\mu L} . \quad 1.5$$

O escoamento deve satisfazer algumas hipóteses para que a lei de Darcy possa ser empregada. Seu uso se restringe a situações onde (Rosa, de Souza Carvalho, e Xavier 2006):

1. O fluido preenche todo o espaço poroso
2. O escoamento é laminar, isotérmico e se encontra em regime permanente.
3. O fluido é incompressível e newtoniano.
4. O meio poroso é homogêneo e não reage com o fluido

No SI a permeabilidade tem a unidade de m^2 mas é usual na indústria de óleo e gás o emprego de D ("Darcy") ou ainda mD. Sendo que $1D \approx 0.987 \times 10^{-12} m^2$.

1.2.4 Pressão Capilar

Pressão capilar e molhabilidade são propriedades que têm grande importância na caracterização de um reservatório, que geralmente contém em seu interior líquidos imiscíveis molhantes e não-molhantes (como será definido nos parágrafos seguintes). De forma básica pode-se dizer que esta propriedade relaciona-se com a energia necessária para se fazer escoar um fluido não-molhante através de um meio poroso saturado com fluido molhante (Ahr 2011).

Fluidos são chamados de miscíveis quando produzem uma mistura homogênea. Caso isso não ocorra, existirá uma separação entre os fluidos e haverá o surgimento de uma *interface* (também chamada de *superfície* quando o fluido menos denso for o ar). Os fenômenos capilares irão existir devido à diferentes composições das forças de

atração que sofre uma molécula do fluido mais denso que se encontre nesta interface. Enquanto as moléculas no interior do fluido são atraídas igualmente em todas as direções, moléculas da interface tem como resultante uma força que lhe atrai para o interior do fluido como é representado na Figura 3.

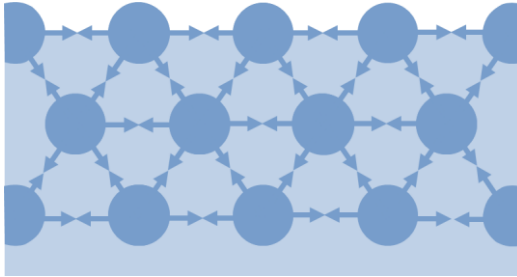


Figura 3 Esquema das forças de atração das moléculas no interior de um fluido e na interface com outro fluido menos denso.

A força por unidade de comprimento que impede o rompimento da superfície é denominada tensão interfacial ou superficial (σ). A composição destas irá resultar na força mencionada que tende a trazer as moléculas da interface para o interior do fluido é denominada força capilar (F_C) e dividida pela área da superfície é denominada pressão capilar (P_C).

A Figura 4 mostra uma representação do sistema de forças existentes em um elemento de interface dos fluidos. Desta forma a tensão interfacial pode ser escrita como:

$$\sigma = \frac{dF_1}{da} = \frac{dF_2}{db} \quad 1.6$$

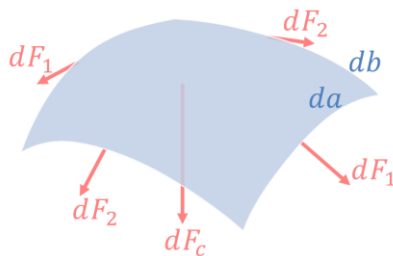


Figura 4 Esquema do sistema de forças existentes em um elemento de interface de dois fluidos imiscíveis. Adaptação de Rosa (2006)

E a pressão capilar é definida por

$$P_C = \frac{F_C}{dad b}, \quad 1.7$$

de forma que F_C representa a força resultante na direção vertical. Outra característica importante sobre a pressão capilar é que sua magnitude define a diferença de pressão existente entre os fluidos separados pela interface.

Uma propriedade correlacionada à pressão capilar é a molhabilidade, que representa a tendência de um fluido ser preferencialmente atraído à uma superfície sólida de um determinado material. A Figura 5 mostra o equilíbrio de forças de uma gota de um fluido em contato com uma superfície sólida e um fluido menos denso. O ângulo de contato (θ) é o ângulo variando de 0° à 180° medido no fluido mais denso à partir do sólido. Quando θ é menor que 90° , se diz que o fluido mais denso é *molhante*, ou seja, molha preferencialmente a superfície sólida, e o menos denso é *não-molhante*. Quando θ é superior à 90° , a situação se inverte, o fluido mais denso e menos denso são não-molhantes e molhantes respectivamente.

Através do equilíbrio de forças, se define a tensão de adesão (σ_A) como a diferença de tensões ao longo da superfície sólida:

$$\sigma_A = \sigma_{sn} - \sigma_{sw} = \sigma_{wn} \cos \theta. \quad 1.8$$

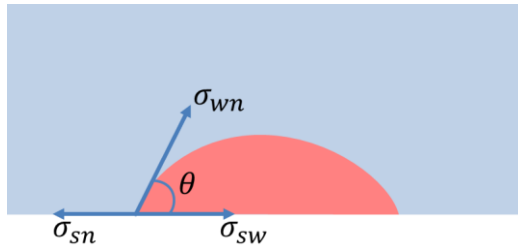


Figura 5 Equilíbrio de forças existentes na interface de fluidos molhante e não-molhante sobre uma superfície sólida

Ao se mergulhar um tubo capilar em um tanque contendo dois fluidos imiscíveis, observaremos que a depender da molhabilidade dos fluidos em relação à superfície interna do tubo, um dos fluidos tende a "invadir" o interior do capilar. Como resultado observamos a ascensão ou depressão do nível do fluido mais denso. Esta situação é representada no esquema da Figura 6. O sistema apresentado se encontra em equilíbrio, de forma que a força de adesão tem a mesma magnitude do peso da coluna do fluido mais denso no interior do capilar.

$$\text{Força de adesão} = \text{Peso da coluna do fluido mais denso} \quad 1.9$$

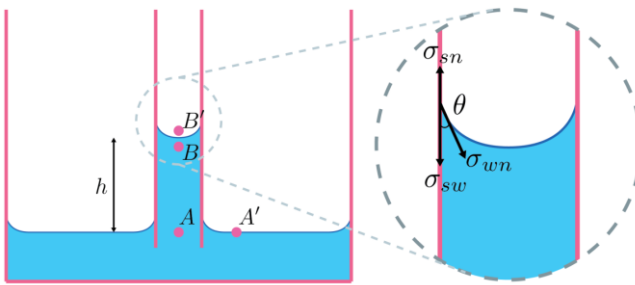


Figura 6 Representação de um tubo capilar e a ascensão do fluido mais denso, neste caso molhante

A força de adesão é o produto da tensão de adesão e o perímetro do tubo capilar, então:

$$\text{Tensão de adesão} \times \text{Perímetro} = \text{Peso da coluna do fluido mais denso} \quad 1.10$$

O peso da coluna de água é calculado pelo produto da pressão estática e área da seção do tubo.

$$\sigma_A 2\pi r = \Delta \rho g h \pi r^2, \quad 1.11$$

sendo $\Delta \rho$ a diferença entre a massa específica do fluido molhante e não-molhante ($\rho_w - \rho_n$) e r o raio do tubo capilar. Assim, pode-se escrever a altura do fluido mais denso no tubo capilar como:

$$h = \frac{2\sigma_A}{\Delta\rho gr} \quad 1.12$$

A partir da equação 1.8 podemos reescrever a altura:

$$h = \frac{2\sigma_{wn} \cos\theta}{\Delta\rho gr} . \quad 1.13$$

É possível definir uma equação para a pressão capilar em função da tensão interfacial dos dois fluidos, o ângulo de contato e o raio do tubo capilar. Para isto utiliza-se a definição de que a pressão capilar tem a sua magnitude igual à diferença de pressão entre o fluido menos denso logo acima da interface e o mais denso, logo abaixo.

A pressão capilar pode ser escrita então como a diferença de pressões nos pontos B e B' :

$$p_C = p_B - p_{B'} . \quad 1.14$$

Levando em conta que $p_B = p_A + \rho_w gh$, a equação para pressão capilar pode ser posta como:

$$p_C = p_A - p_{B'} + \rho_w gh \quad 1.15$$

Utilizando a representação do tubo capilar da Figura 6, pode-se inferir que a diferença de pressão em A' e B' pode ser escrita como $p_{A'} - p_{B'} = \rho_n gh$. E a pressão nos pontos A e A' são iguais por serem dois pontos situados no mesmo nível no interior de um fluido. Desta forma $p_A = p_{A'}$ e:

$$\begin{aligned} P_c &= \rho_w gh - \rho_n gh, \\ P_c &= \Delta\rho gh \end{aligned} \quad 1.16$$

Com a substituição da altura obtida na equação 1.13, por fim podemos escrever a pressão capilar como:

$$p_c = p_B - p_{B'} = \frac{2\sigma_{wn} \cos\theta}{r} \quad 1.17$$

É possível constatar por meio da equação 1.17 que a pressão capilar é diretamente proporcional à tensão interfacial entre os dois fluidos e inversamente proporcional ao raio do capilar. Isto demonstra a maior diferença de pressão necessária para que o fluido possa vencer a força capilar.

Normalmente se apresenta esta informação em rochas reservatórios com a utilização de curvas de pressão capilar. Estes gráficos irão relacionar as situações de invasão de fluido não-molhante em um sistema poroso preenchido inicialmente por fluido molhante (a essa situação é dado o nome de *drenagem*), ou o oposto: A intrusão de fluido molhante em um meio dominado por fluido não-molhante (chamada de *embebição*).

Ao analisarmos o caso da drenagem, considera-se normalmente o meio preenchido totalmetne pelo fluido molhante (em rochas reservatório assume-se que naturalmente este fluido inicial era a água e, por conta disso, considera-se a curva de drenagem mais representativa na análise de um reservatório) o que significa uma saturação de 100%. Conforme aumenta-se a pressão do fluido não-molhante este irá preencher alguns dos poros da rocha, inicialmente aqueles de maior tamanho. A medida que se aumenta esta pressão, poros de menor tamanho serão também invadidos. Costuma-se contabilizar o volume dos poros preenchidos pelos fluidos através das suas saturações (saturação de fluido molhante S_w e não molhante S_{nw}). A curva de pressão capilar é justamente a coleção destes pontos correspondentes: A diferença de pressão entre os dois fluidos (pressão capilar) e suas saturações. A Figura 7 apresenta o comportamento típico destes gráficos.

Em um primeiro momento observa-se normalmente um aumento de pressão sem uma variação expressiva de saturações. Isto é interpretado como o fluido não-molhante preenchendo os poros maiores de fronteira, sem propriamente deslocar-se para o interior da rocha. Para uma saturação crítica, a depender da geometria e molhabilidade dos materiais e fluidos, o fluido não-molhante passa a deslocar o fluido molhante no interior da rocha e observa-se grande variação de saturação com poucos incremento de pressão capilar. Isto ocorre até que a curva

obtenha o comportamento de uma assíntota, e mesmo com aumento de pressão não há mais a expulsão do fluido molhante, que usualmente permanece em uma parcela no interior da amostra.

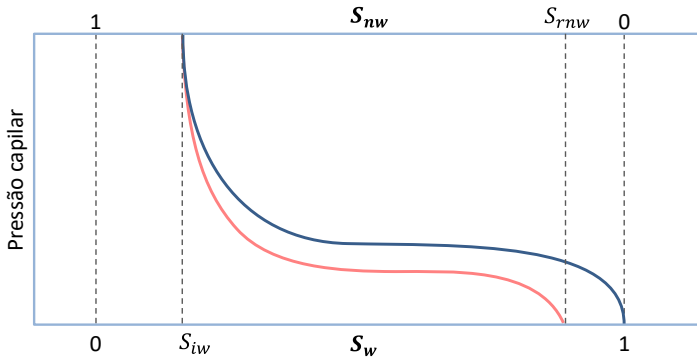


Figura 7 Comportamento típico de curvas de pressão capilar para drenagem e embebição

Isso se deve ao fato do fluido não molhante invadir progressivamente os poros de maior diâmetro em primeiro lugar, muitas vezes aprisionando o fluido molhante, que não encontra mais meios de escoar. À esta quantidade de fluido molhante que permanece em uma drenagem se dá o nome de **saturação irreduzível do fluido molhante** (S_{iw}).

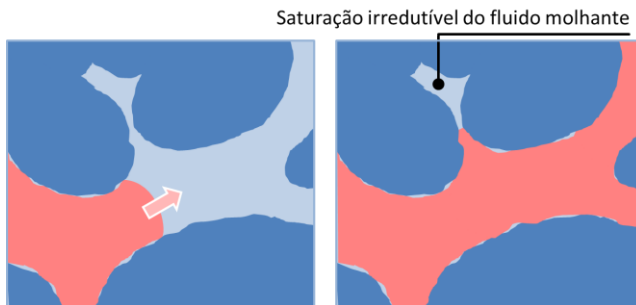


Figura 8 Representação da saturação irreduzível de fluido molhante em um processo de drenagem

Para o caso da embebição, os valores de pressão do fluido não molhante são reduzidos progressivamente para que o molhante retorne a

ocupar o espaço poroso. Observa-se o comportamento contrário do que ocorre na drenagem. Inicialmente o fluido não molhante deixa os poros de menor diâmetro de maneira que o fluido que molha preferencialmente a rocha invada os poros de menor diâmetro.

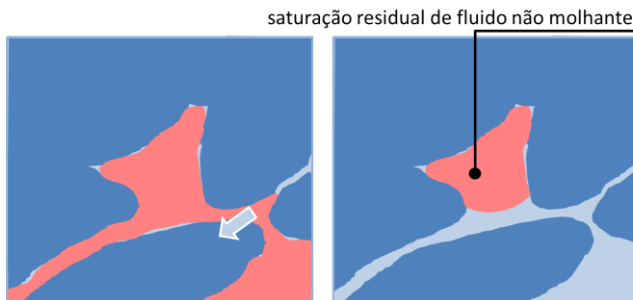


Figura 9 Representação da saturação residual de fluido não molhante em um processo de embebição

Este comportamento irá também ocasionar o mesmo fenômeno de aprisionamento de fluido não molhante em alguns poros maiores (que, com o processo de embebição, não encontrarão mais caminhos para escoar). À quantidade de fluido não molhante retido por este fenômeno é dado o nome de **saturação residual de fluido não molhante** (S_{rnw}).

1.3 Caracterização de reservatórios por análise de imagens

Os métodos experimentais são realizados rotineiramente na indústria de óleo e gás para a obtenção das propriedades petrofísicas de amostras de um reservatório. Estes experimentos são em sua maioria realizados em plugues extraídos de testemunhos¹ retirados da rocha-reservatório de interesse.

Porém, os ensaios são muitas vezes custosos em termos de recursos e de tempo para execução. Na procura por alternativas viáveis, a extração de propriedades através de análise de imagens vem se mostrando uma ferramenta bastante útil para avaliações preliminares e capaz de complementar alguns dos experimentos. Esta família de métodos apresenta como vantagens (Cunha 2012):

¹ Testemunho é uma amostra da rocha, retirada de profundidades pré-determinadas trazendo informações pontuais do meio poroso

1. Uniformidade e repetitividade das análises
2. Redução dos custos e de tempo de realização em relação aos métodos experimentais
3. Obtenção de alguns parâmetros que só podem ser obtidos diretamente através de imagens, como conectividade da estrutura porosa e geometria dos poros e grãos
4. Extração de várias propriedades petrofísicas a partir da mesma amostra

De maneira geral, as etapas para se empregar tais técnicas podem ser enumeradas como:

1. Extração da imagem tridimensional da amostra
2. Binarização da imagem
3. Cálculo de propriedades petrofísicas (seja por simulação direta no domínio discreto da imagem ou através de uma rede topologicamente equivalente)

Esta enumeração destaca os aspectos comuns nos métodos por análise de imagem, mas estes, com suas particularidades podem suprimir ou exigir algumas etapas adicionais, como será explicado quando for necessário. As seções seguintes procuram fazer uma revisão dos métodos utilizados para cada etapa mencionada.

1.3.1 Obtenção de imagens tridimensionais

Os métodos para se gerar imagens tridimensionais de espaços porosos se dividem em duas grandes categorias. A primeira, chamada de "*direct imaging*", produz imagens que mapeiam a real estrutura do interior da amostra. Métodos que partem desta abordagem incluem o seccionamento serial e a tomografia de raios X. Os métodos que fazem parte da segunda categoria procuram gerar imagens tridimensionais sintéticas a partir de imagens bidimensionais usando métodos estatísticos ou simulação de processos geológicos. A seguir serão apresentados alguns dos métodos mais utilizados pela indústria para obtenção de imagens tridimensionais das amostras.

Método de reconstrução estatística

Este método procura criar uma distribuição gaussiana de voxels (o equivalente a pixel para três dimensões) vazios (representando o espaço poroso) e voxels grãos (para a matriz sólida) que mantenham as propriedades geométricas encontradas em seções delgadas da rocha. Estas propriedades incluem porosidade (também chamada de correlação de um ponto) e a correlação de dois pontos, que seria a probabilidade de se encontrar dois pontos separados por determinada distância que pertençam à mesma fase. Porém estas técnicas são insuficientes para caracterizar o espaço poroso (Adler, Jacquin, e Thovert 1992; Ioannidis e Chatzis 2000; Quiblier 1984; Roberts 1997). Okabe e Blunt (2004, 2005) desenvolveram um método estatístico multi-pontos que conserva os padrões típicos encontrados na imagem bidimensional na imagem tridimensional reconstruída

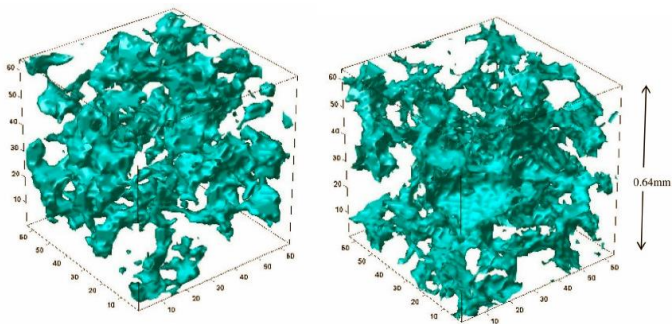


Figura 10 Comparação entre imagens de tomografia de raios X e reconstrução estatística multi-pontos de Okabe e Blunt (2004, 2005)

Este método apresentava grande vantagem sobre a tomografia quando a precisão dos tomógrafos era da ordem de poucos micrometros (hoje já se consegue chegar a escala nanométrica). Desta forma não se conseguia representar estruturas porosas com dimensões da ordem de micrometro (como aqueles que estão presentes na maioria das rochas carbonáticas) com a resolução disponível nos aparelhos e por conta disto a reconstrução por métodos estatísticos já foi o único método capaz de representar características dos carbonatos.

Método baseado em processos

Este método procura gerar a representação do espaço poroso da rocha simulando os processos geológicos que ocorrem na sua formação. Os primeiros trabalhos com esta abordagem foram de Bryant, King e

Mellor (1993), simulando o empacotamento de esferas de mesmo tamanho. Øren e Bakke (2002) deram prosseguimento no desenvolvimento do método incluindo diferentes tamanhos de grãos e processos geológicos mais complexos como sedimentação, compactação e diagênese. A distribuição dos tamanhos de grãos é retirada de seções delgadas da rocha.

Os resultados obtidos são muito bons para caracterização de rochas homogêneas como os arenitos. Porém para rochas com um histórico geológico mais complexo como é o caso dos carbonatos, o emprego deste método torna-se demasiadamente complexo e proibitivo.

Tomografia de raios X

Em 1895, o físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen descobriu um novo tipo de radiação ao estudar fenômenos luminescentes. Denominada de radiação X, apresentava características particulares: Não ionizava o ar, não era afetada por campos elétricos e eletromagnéticos e poderia atravessar materiais sólidos. Hoje se sabe que se tratam de emissões eletromagnéticas de pequeno comprimento de onda (0.05 ångström até dezenas de ångström) (Mantovani 2013).

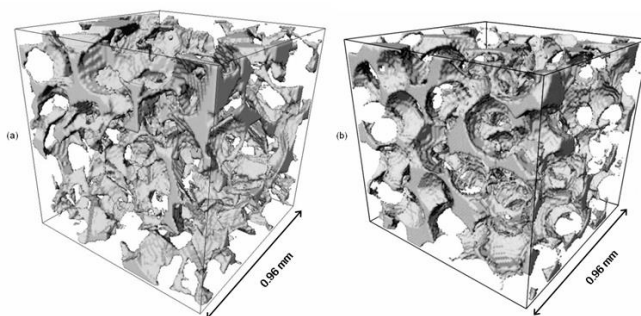


Figura 11 Comparação entre imagens de tomografia de raios X e construção da imagem por método de processos (Øren e Bakke 2002)

Ao atravessar a matéria, a radiação tem sua intensidade atenuada, devido a processos de dispersão e absorção. Esta atenuação pode ser escrita pela equação de Lambert-Beer

$$I = I_0 e^{-\lambda x} \quad 1.18$$

$$I_0 = I(x = 0)$$

onde x corresponde à espessura da amostra, I_0 a intensidade incidente na amostra, I a intensidade resultante após a passagem e por fim λ é o coeficiente de atenuação linear. Este coeficiente depende do peso molecular e da densidade do material. A tomografia por raios X tem como objetivo mapear este coeficiente de atenuação, o que irá inferir nas variações de densidade do material sendo analisado. Na tomografia de raios X computadorizada, ao invés de uma, várias projeções são retiradas enquanto a amostra é rotacionada ao passo de pequenos ângulos. Na sequência, a imagem tridimensional é construída tendo como base as diversas projeções bidimensionais através de processamento numérico. A Figura 12 mostra uma representação dos processos envolvidos.

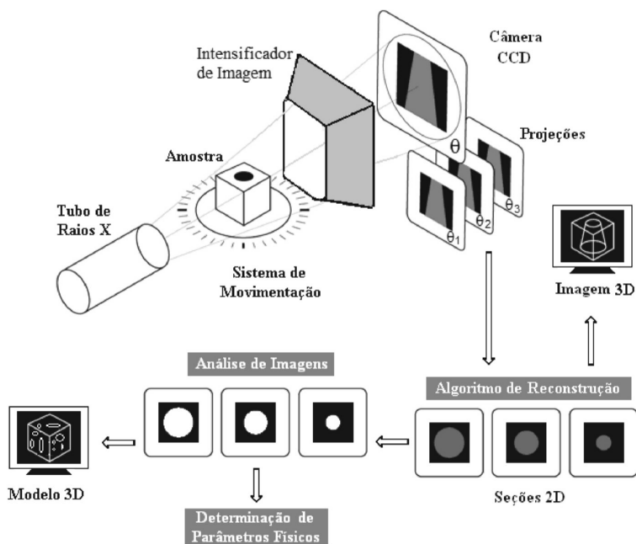


Figura 12 Representação das etapas envolvidas em uma tomografia de raios X (Silva 2012)

Os equipamentos evoluíram de tal forma que hoje a resolução espacial permite a análise na escala nanométrica. Sendo assim a tomografia se mostra um ótimo meio de se obter imagens

tridimensionais do meio poroso, por se tratar de um método de "*direct imaging*" (extração direta de dados da amostra) e por ser não-destrutiva.

1.3.2 Binarização da Imagem

Ao efetuar a extração de uma imagem da rocha, como por exemplo no caso da tomografia, haverá uma distribuição de densidade do material, geralmente representado por voxels em tons de cinza. É preciso, no entanto, definir quais destes serão voxels de grão ou poro. É usual representar cada voxel então com o valor de 0 ou 1 e a este processo se dá o nome de binarização.

A binarização consiste em comparar a densidade de cada voxel da imagem com um determinado *threshold* ou limite: de forma que caso a densidade seja superior a este limite, assume o valor de 1 e caso contrário, assume o valor de 0.

A escolha do valor de *threshold* pode ser realizada manualmente ou através de uma análise numérica, das quais pode-se escolher entre muitos algoritmos existentes (Sezgin 2004) cujo detalhamento foge agora ao escopo deste trabalho.

1.3.3 Determinação de Propriedades Petrofísicas

Tendo em mãos a representação do domínio poroso em uma imagem binarizada tridimensional, pode-se partir para o cálculo ou estimativa das propriedades petrofísicas da rocha em questão. Estas estimativas são feitas a partir da simulação do escoamento de fluidos através da modelagem numérico/matemática deste fenômeno. A partir de alguns resultados obtidos por este procedimento, como diferencial de pressão, vazão do fluido, saturação dos fluidos (caso seja multi-fásico), etc. pode-se inferir as propriedades de interesse como permeabilidade absoluta, permeabilidade relativa, pressão capilar entre outras. Atualmente, consideram-se duas grandes abordagens no que diz respeito à simulação de escoamento na estrutura porosa da rocha na escala dos poros: A modelagem por **Lattice-Boltzmann** e a baseada no conceito de **Rede de poros e ligações**.

O método de Lattice-Boltzmann utiliza-se de conceitos de mecânica estatística. Busca modelar o comportamento dos fluidos em uma escala intermediária à utilizada pela mecânica do contínuo e a dinâmica molecular lagrangeana. Representa o fluido através de funções

de distribuições do estado de suas moléculas, como suas velocidades. Não trata das moléculas como partículas unitárias, mas de conjuntos de moléculas que pertencem a determinados estados. É a chamada mesoescala. Estes conjuntos de moléculas estão distribuídos de maneira discreta em um *lattice*, e a suas interações reproduzem as propriedades macroscópicas de um fluido. Traz como vantagem a facilidade no tratamento de geometrias complexas e de escoamentos multifásicos (Benzi, Succi, e Vergassola 1992; Chen e Doolen 1998; Rothman e Zaleski 1994).

A aplicação da modelagem com Lattice-Boltzmann tem boa aceitação na indústria porém está limitada por seu alto custo computacional (Chen e Doolen 1998) que chega a ser proibitivo em algumas situações, especialmente quando se pensa em estender a técnica para análises de uma rocha em múltiplas escalas de resolução.

1.3.4 Rede de poros e ligações

A abordagem alternativa trabalha na construção de uma estrutura topologicamente equivalente ao sistema poroso da imagem (isto é, preservando as conectividades entre os poros) porém com uma geometria simplificada.

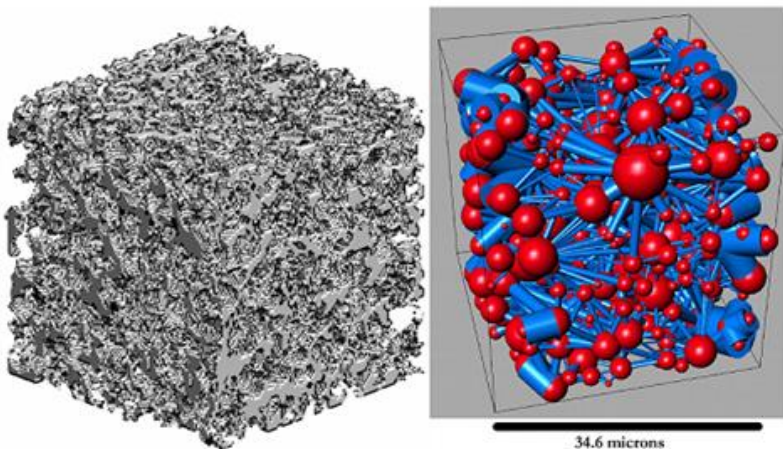


Figura 13 Rede de poros e ligações gerada no trabalho de Øren (2002, 2003)

Essa rede procura imitar uma rocha porosa em sua natureza, que é composta de espaços maiores entre grãos (chamados de poros) e

aberturas alongadas (gargantas ou ligações) que ligam estes espaços. É assumido que tanto os poros quanto as conexões tenham seções transversais constantes e são aplicados fatores de forma para representar as irregularidades e tortuosidades das estruturas reais. Uma vez que esta rede for determinada, o escoamento através desta pode ser calculado de forma semi-analítica onde os poros atuam como armazenamento de fluido e as gargantas como passagem dos fluidos de um poro à outro. O método apresenta bons resultados desde que se tenha uma rede com boa representatividade do meio poroso (Al-Kharusi 2007; Dong 2008). As seções seguintes trazem os principais métodos existentes na literatura para extração de redes como esta.

Algoritmos baseados no conceito de eixo médio

Os métodos de extração baseados no eixo médio transformam o espaço poroso em uma representação reduzida, ou um esqueleto, contendo ramificações que passam pelo centro dos canais porosos. O eixo médio pode ser encontrado através de algoritmos de "thinning" (Baldwin et al. 1996; Liang et al. 1999) ou de erosão (Lindquist et al. 1996). O espaço poroso é erodido de diferentes sentidos até chegar a um único voxel, que guarda o número relacionado à erosão e será o raio máximo da maior esfera com centro neste voxel.

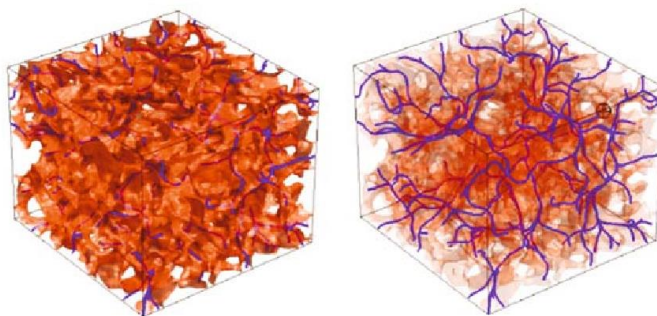


Figura 14 Extração da rede de poros por meio de algoritmos de eixo médio (Schna e others 2004)

Este método apresenta como desvantagens a dificuldade na identificações de poros e o número de conexões excessivamente alto. Isto acontece devido à sensibilidade do método à perturbações na imagem da superfície dos grãos. Silin e Patzek (2006) apontaram estes

problemas ilustrando uma situação onde a superfície de um poro é irregular e o algoritmo do eixo médio encontraria quatro poros distintos onde em uma análise visual se identifica apenas um, como pode-se verificar na Figura 15. O mesmo pode ser feito com um paralelepípedo, aonde são identificados quatro nós ao utilizar o algoritmo de eixo médio e se espera que exista apenas um poro.

Alguns autores (Sheppard, Sok, e Averdunk 2005; Shin et al. 2005) propuseram melhorias para o método, desenvolvendo um algoritmo de "limpeza" do esqueleto gerado e responsável por agrupar elementos encontrados. Porém a escolha do critério para junção destes elementos deve ser feita com cuidado.

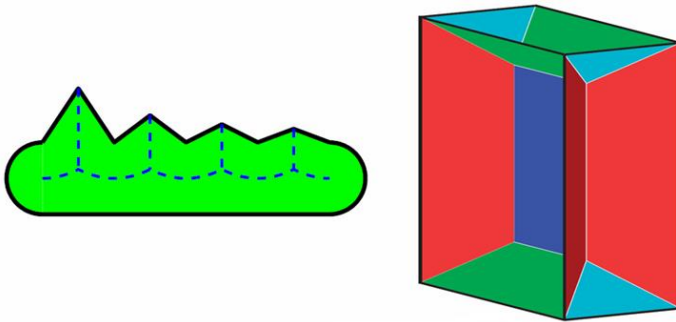


Figura 15 Problemas do método baseado em eixo médio e sua sensibilidade à irregularidades na superfícies das imagens (Silin e Patzek 2006)

Algoritmos baseados no diagrama de Voronoi

O diagrama de Voronoi pode ser empregado para extrair redes de imagens geradas pelo método baseado em processos, o que é facilitado por se conhecer com exatidão o centro de cada grão, (Bryant e Blunt 1992; Bryant, King, et al. 1993; Bryant, Mellor, e Cade 1993; Bryant e Raikes 1995; Øren e Bakke 2002, 2003). Redes extraídas por este método tiveram resultados positivos em simulações de fluxo. Delereu e Perrier (2002) desenvolveram uma metodologia que utilizava também diagramas de Voronoi para uma imagem tridimensional binarizada genérica (obtida por outros meios que não pelo método baseado em processos). Elementos discretos são construídos segmentando-se o espaço poroso a partir de segmentos distribuídos nas superfícies dos

grãos. O diagrama de Voronoi é criado a partir destes segmentos e o esqueleto é extraído a partir da seleção de suas ramificações. Verificou-se que a topologia é pobre comparando-se as redes extraídas por Øren e Bakke (2003)

Algoritmos baseados no conceito de esferas máximas

O conceito de esferas máximas tem suas primeiras aparições nos trabalhos de Magnani et al (1997) e Silin e Patzek (2006). O método procura as maiores esferas inscritas no espaço poroso, que tocam a superfície dos grãos. A procura é realizada criando-se esferas centralizadas em cada voxel de poro da imagem tridimensional. Na sequência, as esferas completamente incluídas em outras maiores são removidas. No trabalho de Silin e Patzek as esferas vizinhas eram então classificadas em "masters" e "slaves" de acordo com o tamanho relativo de seus raios. Uma esfera poderia ser ao mesmo tempo "slave" e "master". As esferas maiores irão caracterizar os poros enquanto as menores irão constituir as gargantas. Silin e Patzek utilizaram o método de bolas máximas apenas para calcular pressão capilar, e não foi extraída uma rede propriamente dita.

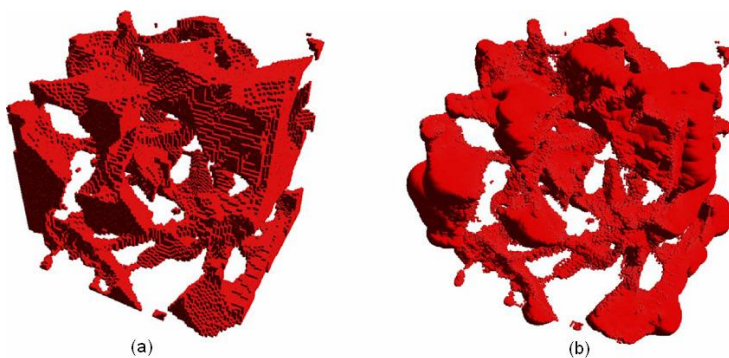


Figura 16 (a) imagem tridimensional binarizada de um meio poroso. (b) representação através de esferas máximas (Silin e Patzek 2006)

Al-Kharusi e Blunt (2007) estenderam o método extraindo com sucesso uma rede de poros e ligações e então calculando a permeabilidade absoluta. Eles adicionaram mais uma relação entre as esferas. A de "clusters" para eliminar a ambiguidade anteriormente existente no caso de esferas de mesmo raio que se intersectam. Porém

esta abordagem ainda apresenta algumas dificuldades na extração de redes em casos de sistemas porosos mais complexos onde há o encontro de diversos destes "clusters". Além disso a implementação do método em computadores requer um alto uso de memória e o número de coordenação das redes gerada é bastante alto e não representativo.

Dong (Dong 2008) introduziu uma concepção diferente à etapa de Clustering. Foram estabelecidas relações de parentesco e introduzidos o conceito de “famílias”, de forma a identificar os poros como ancestrais e as ligações como a junção entre as famílias de esferas, havendo uma classificação semelhante à uma árvore genealógica.

2 EXTRAÇÃO DA REDE DE POROS E LIGAÇÕES

Neste capítulo serão apresentados em detalhes os conceitos e as etapas envolvidas no processo de extração da rede de poros e ligações a partir de uma imagem binarizada. Esta imagem, que serve como dado de entrada para a geração da rede, pode ser obtida por qualquer um dos métodos apresentados no capítulo 1. Embora deva-se salientar que as imagens utilizadas neste trabalho são adquiridas a partir da tomografia computadorizada com um posterior processo de binarização. Com exceção de algumas imagens sintéticas produzidas com fim de validação do método.

Dentre os métodos existentes na literatura para a geração da rede, foi escolhido o método de Esferas Máximas. A motivação é que, segundo a literatura, este método traz uma boa representatividade do meio poroso e uma boa capacidade de identificação e diferenciação de poros e ligações (Dong 2008; Silin e Patzek 2006). É também tratado como um método mais robusto (quando comparado aos métodos de eixo médio cujo resultado, a qualidade e representatividade da rede são altamente dependentes do ruído existente da imagem adquirida) e mais versátil (quando comparado àqueles baseados na triangularização de Voronoi, que na literatura são associados com imagens adquiridas por método de processos que são incapazes de representar rochas carbonáticas).

A metodologia utilizada tem forte embasamento nos trabalhos Al-Kharusi (2007) e Dong (2008): Principalmente no trabalho deste último autor, pela forma como concebeu a etapa de aglomeração e na utilização de dois valores para raio de uma esfera discreta. No entanto, ao longo do capítulo serão apresentadas algumas mudanças realizadas com o propósito de melhoria nos tempos de execução do algoritmo.

2.1 Etapas de construção da rede

A extração de uma rede de poros e ligações através do método de esferas máximas a partir da imagem binarizada do meio poroso é realizada em quatro etapas:

1. Busca de esferas inscritas
2. Busca das esferas máximas (remoção de inclusões)
3. *Clustering* (Aglomeração)

4. Expansão de gargantas

A Figura 17 apresenta todas as etapas de geração da rede a partir de uma região da amostra original.

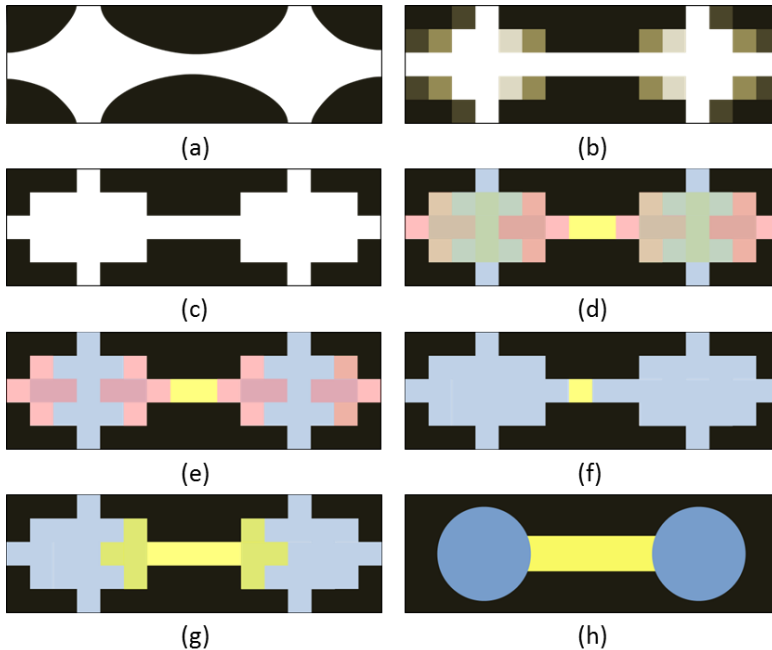


Figura 17 Representações do processo de extração da rede: (a) Amostra original (b) Imagem adquirida através do tomógrafo em tons de cinza, com uma determinada resolução (c) Binarização da imagem (d) Busca de esferas inscritas (e) Busca das esferas máximas (f) Clustering (g) Expansão de gargantas (h) Geração da rede

2.2 Busca de esferas inscritas

A imagem binarizada é um volume de dados cujo elemento fundamental é chamado de *voxel* (em linhas gerais: o equivalente tridimensional do *pixel*) segmentado em duas fases, como já abordado. Em análise de imagens estas fases são referidas como *foreground* e *background* da imagem. Como nosso problema está inserido no contexto de análise de meios porosos, a estas fases serão utilizadas as identificações de voxel de poro (referente aos voxels da imagem representando o espaço poroso da rocha) e voxel de grão (referente aos

voxels que compõem a matriz da rocha, sua fase sólida). Por convenção, quando apresentada uma imagem binarizada bidimensional, a título de ilustração dos métodos neste trabalho se adotará o valor de 1 para os voxels de poro e 0 para os voxels de grão.

O método baseado em esferas máximas busca preencher todo o espaço poroso da imagem com esferas discretas, e destas aproveitar apenas algumas delas que são chamadas de esferas máximas. Nesta seção busca-se apresentar estes conceitos.

2.2.1 Esferas discretas

A esfera discreta como o nome diz é uma representação deste elemento em um domínio discreto. Desta forma, pode-se interpretá-la como um conjunto de voxels. De maneira que uma esfera com o centro localizado em um determinado voxel (c_i, c_j, c_k) e de raio R é definida pelo conjunto de voxels (i, j, k) :

$$\left\{ (i, j, k) \mid (i - c_i)^2 + (j - c_j)^2 + (k - c_k)^2 < R^2 \right\}. \quad 2.1$$

Este conceito pode ser melhor entendido na Figura 18, aonde se busca em um domínio bidimensional tratar como o valor do raio influirá nos voxels que irão compor a esfera.



Figura 18 Representação de esferas discretas no domínio bidimensional

Para o domínio tridimensional são apresentados na Figura 19 esferas com raios de $\sqrt{2}$, 2 e $\sqrt{14}$

Dong utilizou em seu trabalho o conceito de dois valores de raio para a definição de uma esfera discreta: O R_{min} e R_{max} . O R_{max} é

equivalente ao conceito de raio da esfera discreta apresentado na equação 2.1.

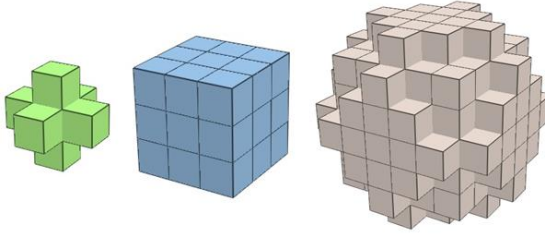


Figura 19 Representação de esferas discretas no domínio tridimensional

Sendo assim e por brevidade, no decorrer do texto deste trabalho, quando se referenciar ao raio de uma esfera discreta, sem especificar se trata do R_{min} ou R_{max} , se tratará do R_{max} . Assim definimos que

$$R = R_{max}. \quad 2.2$$

O R_{min} será a maior distância existente entre o voxel do centro v_c e um dos voxels que compõem a esfera (v).

$$R_{min}^2 = \max \left(\text{dist}^2(v_c, v_v) \mid \text{dist}^2(v_c, v_v) < R_{max}^2 \right) \quad 2.3$$

O uso destes dois valores de raio para um esfera discreta é justificado ao se analisar a aproximação existente de um domínio contínuo para um discreto associado com uma determinada resolução². Durante o processo de obtenção e binarização da imagem, a interface verdadeira entre o poro e o grão é perdida. À medida que o espaço poroso for preenchido por esferas discretas, sabe-se que a verdadeira

² A definição utilizada neste trabalho para resolução da imagem é a razão entre o número de voxels da imagem e a dimensão real que esta imagem representa. Desta forma, quanto mais voxels utilizados para uma mesma, menor será o “tamanho do voxel” e maior será a resolução e.g. Uma imagem com tamanho de voxel de 5.4 μm tem resolução maior que outra com tamanho de voxel de 10.0 μm

interface estará entre os valores de R_{min} e R_{max} . Tomemos como exemplo o caso elementar de um poro de uma imagem de resolução de 1 μm composto por um único voxel. Sabe-se que de fato o raio real (se a binarização tenha sido feita de maneira apropriada) deste poro estará entre os valores de 0 e 1 μm .

Dong apresentava outras razões para o uso desta técnica que serão melhor compreendidas em seções futuras deste trabalho. O autor utilizava estes valores em sua técnica de remoção de inclusões de esferas, e também para produzir curvas de pressão capilar com menos descontinuidades.

No caso de um domínio bidimensional, uma esfera de raio 2, terá $R_{min} = \sqrt{2}$. O valor real do raio deste poro encontra-se entre os valores de 2 e $\sqrt{2}$ μm .

A primeira etapa do método consiste em preencher todo o espaço poroso da imagem binarizada com esferas discretas. Para tanto, serão criadas esferas com centro em cada voxel de poro.

Desta forma, ao fim desta etapa haverá tantas esferas quanto voxels vazios na imagem. O raio de cada esfera será tal que seja o maior possível, mas garantindo que a esfera possua apenas voxels que pertençam ao espaço poroso.

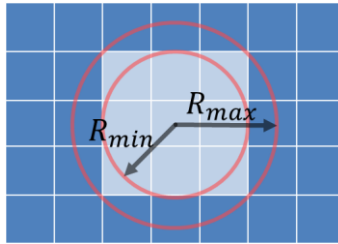


Figura 20 Demonstração dos dois valores de raio para uma esfera discreta, utilizado por Dong (Dong 2008)

A Figura 21 demonstra o resultado esperado ao final da busca por esferas inscritas em um caso bidimensional, onde (a) é a imagem binarizada de entrada e (b) é uma matriz que armazena R^2 de cada esfera. A posição na matriz é referente à localização de seu centro.

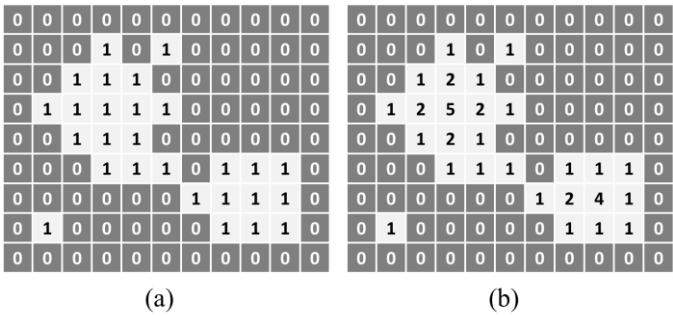


Figura 21 Resultado esperado da busca por esferas inscritas em um caso bidimensional

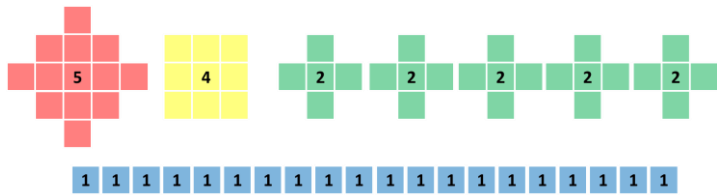


Figura 22 Esferas inscritas no exemplo fornecido pela Figura 21 dispostas lado a lado

2.2.2 Algoritmo para inflar esferas

Para cumprir a etapa de buscas pelas esferas, Dong (Dong 2008) e Al-Kharusi (2007) utilizaram em seus trabalhos técnicas semelhantes que envolvem a “inflagem” de esferas.

O método consiste em posicionar uma esfera de $R = 1$ em cada voxel vazio e iniciar um processo de buscas nas direções laterais, diametrais e diagonais como mostra a Figura 23. Isto é feito até que se encontre um voxel de grão, o que resultaria no raio da esfera inscrita.

Esta técnica, apesar de cumprir a etapa, se mostra ser muito custosa computacionalmente ao realizar este processo de busca para cada voxel de poro. Uma alternativa bastante mais eficiente para cumprir esta etapa é utilizar a transformada de distâncias euclidianas utilizada no trabalho de Schena (2004).

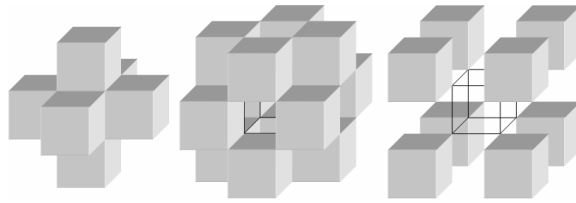


Figura 23 Técnica de “inflação” de esferas para a busca de esferas inscritas (Dong 2008)

2.2.3 Transformada de distâncias euclidianas

Em processamento de imagens, a transformada de distâncias (DT) consiste em converter uma imagem binarizada em outra, chamada de mapa de distâncias. Onde cada elemento do *foreground* possui um valor correspondente à distância até um elemento do *background* mais próximo. O que no contexto deste trabalho significa a menor distância de um voxel de poro até um voxel de grão. Isto resulta precisamente no raio da esfera discreta inscrita no espaço poroso com centro naquele determinado voxel.

Saito e Toriwaki (1994) desenvolveram um algoritmo otimizado para a transformada de distâncias euclidianas ao quadrado (SED – *Squared Euclidean Distance Transformation*). O algoritmo consiste em uma transformada inicial unidimensional na direção primária da imagem (eixo x). Considerando uma imagem bidimensional P , onde \bar{P} representa o *background* da imagem (pixels da matriz sólida) de tamanho $m \times n$, esta etapa de inicialização irá gerar uma imagem G tal que, para uma determinada linha j :

$$g(i, j) = \min \{ |i - x|, 0 ; 1 \leq x < m ; (x, j) \in \bar{P} \}. \quad 2.4$$

Esta inicialização pode ser obtida com um simples algoritmo com uma varredura da esquerda para direita (*forward scan*) e uma varredura da direita para esquerda (*backward scan*). Ao fim desta etapa cada voxel da linha j terá a distância euclidiana unidimensional para o voxel de grão mais próximo. A Figura 24 mostra um pseudo-código para esta etapa do algoritmo, e a Figura 25 demonstra a etapa de inicialização com as duas varreduras para o exemplo apresentado na Figura 21.

```

Gij = Pij
for y = 1 to j:
  # Forward scan
  for x = 2 to i:
    if P(x,y) ≠ 0:
      P(x,y) = P(x-1,y) + 1
  # Backward scan
  for x = i-1 to 1:
    if P(x+1,y) < P(x,y):
      P(x,y) = P(x+1,y) + 1

```

Figura 24 Pseudo-código para a etapa de inicialização do cálculo de SEDT (*Squared Euclidean Distance Transformation*)

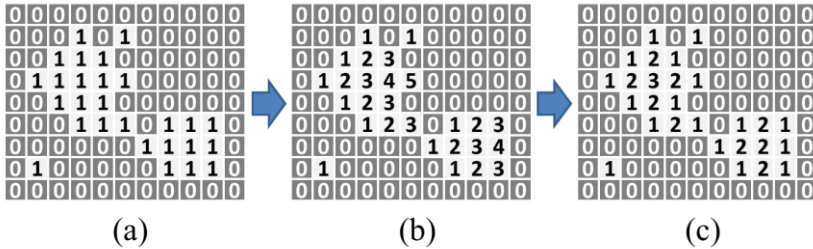


Figura 25 Etapa de inicialização para cálculo de SEDT (*Squared Euclidean Distance Transformation*). Imagem binarizada (a), o resultado obtido após o *forward scan* (b) e *backward scan* (c)

Sob o ponto de vista de custo computacional, dada uma imagem binarizada d -dimensional com forma n^d , esta etapa de inicialização tem uma complexidade da ordem $O(n^d)$

Nas etapas seguintes, para cada dimensão a mais na imagem é realizado um processo de coluna a coluna da imagem onde os valores obtidos na etapa anterior são utilizados para a construção de um conjunto de parábolas na forma da equação 2.5, sendo que $g(i,j)$ é o valor da etapa anterior para a posição (i,j) :

$$F_{i,j}(y) = g(i,j)^2 + (y-j)^2. \quad 2.5$$

O valor para a segunda etapa será calculado pelo envelope inferior do conjunto de parábolas de cada coluna:

$$h(i, j) = \min \left\{ g(i, j)^2 + (y - j)^2 ; 1 \leq y \leq n \right\}. \quad 2.6$$

Para melhor ilustrar o processo, a Figura 26 e a Figura 27 apresentam o conjunto de parábolas, o respectivo envelope inferior para a coluna 4 e 9 e o resultado obtido.

Para a terceira dimensão de uma imagem binarizada tridimensional basta realizar a mesma etapa apresentada acima, de forma que o conjunto de parábolas se dará na forma $F_{i,j,k}(z) = h(i, j, k)^2 + (z - k)^2$. E a avaliação em cada posição do envelope inferior irá retornar a imagem final Q , que pode ser escrita como:

$$q(i, j, k) = \min \left\{ h(i, j, k) + (z - k)^2 ; 1 \leq z \leq p \right\}. \quad 2.7$$

Por fim, ao final teremos uma matriz onde cada elemento não nulo, representa uma esfera inscrita na imagem binarizada. Seu centro é dado pela sua posição na matriz e seu raio pelo valor nele armazenado.

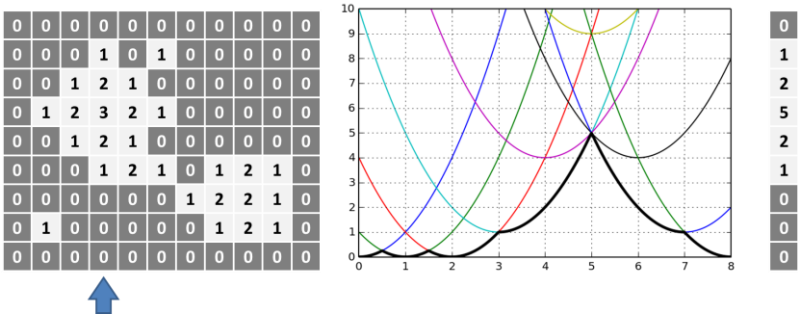


Figura 26 Conjunto de parábolas geradas para a coluna 4, destacando o envelope superior e a coluna 4 resultante após a transformação

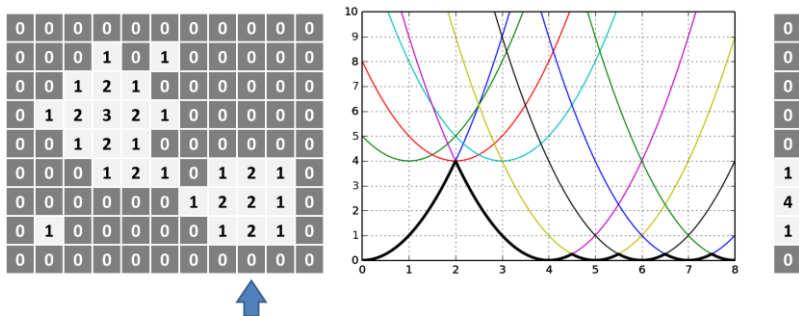


Figura 27 Conjunto de parábolas geradas para a coluna 9, destacando o envelope superior e a coluna 9 resultante após a transformação

2.3 Remoção de inclusões (busca das esferas máximas)

O objetivo de encontrar esferas inscritas no espaço poroso é ser capaz de representá-lo totalmente através destes elementos. Sendo assim, algumas das esferas tornam-se desnecessárias uma vez que se encontram totalmente inclusas dentro de uma ou mais esferas maiores. A etapa de remoção de inclusões irá obter o menor número de esferas que possuam juntas todos os voxels de poro da imagem. A este subconjunto das esferas inscritas se dá o nome de esferas máximas. Em outras palavras, uma esfera máxima é aquela que possua ao menos um voxel de poro da imagem que nenhuma outra esfera inscrita possua. Isto pode ser observado na Figura 28, do exemplo originalmente apresentado na Figura 21, onde são apresentadas as esferas máximas do problema.

2.3.1 Teste de Inclusão de Esferas em Domínio Contínuo

Para identificar as inclusões, Dong e Al-Kharusi avaliam subconjuntos de combinações de duas esferas utilizando seus valores de raio e distâncias aos seus centros em uma combinação em um domínio contínuo. O teste para a inclusão de uma esfera B em uma esfera A é positivo caso a inequação 2.8:

$$\text{dist}(C_A, C_B) \leq R_A - R_B, \quad 2.8$$

seja verdadeira. Esta abordagem apresenta três problemas. O primeiro deles é o desempenho, pois isto exige que esta checagem seja aplicada a cada combinação de duas esferas de todas as esferas inscritas

no meio poroso. Uma opção para reduzir este custo computacional seria fazer uma segmentação espacial (um *hash espacial*) como será explicado mais adiante na seção 2.6 de aglomeração. Mas mesmo com esta abordagem o algoritmo ainda se revela custoso computacionalmente.

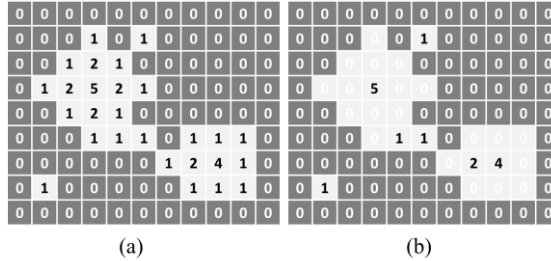


Figura 28 Resultado esperado da busca por esferas máximas em um caso bidimensional

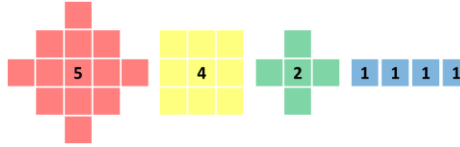


Figura 29 Esferas máximas encontradas no exemplo fornecido pela dispostas lado a lado

O segundo problema é que esta abordagem não contempla esferas que não estão completamente inclusas em outra esfera maior, mas sim na união de duas outras esferas maiores, já que a comparação é feita sempre na forma dois a dois. Isto pode ser observado na Figura 30.

O terceiro problema é que por tratar as esferas como esferas contínuas sendo que em verdade são um conjunto de voxels, muitas vezes a inequação não acusa uma inclusão existente no domínio discreto. Tomando como exemplo o caso da Figura 31. Nela existem duas esferas, uma de raio $\sqrt{2}$ ($R_{max}^2 = 2$ e $R_{min}^2 = 1$) e outra vizinha de raio 1 ($R_{max}^2 = 1$ e $R_{min}^2 = 0$)

Ao utilizarmos a inequação 2.8 não é identificada a inclusão, uma vez que $1 > \sqrt{2} - 1$.

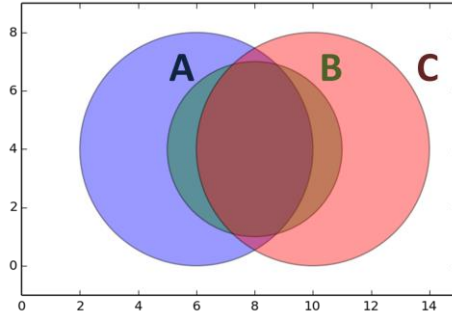


Figura 30 Exemplo onde a esfera B não é identificada como inclusão através da metodologia utilizada por Dong (Dong 2008) e Al-Kharusi (2007)

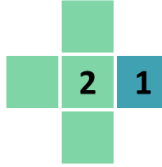


Figura 31 Esfera discreta de $R_{max}^2 = 1$ e $R_{min}^2 = 0$ com o centro afastado em um voxel de uma esfera de $R_{max}^2 = 2$ e $R_{min}^2 = 1$

Dong trata deste problema em seu trabalho e propõe o uso do conceito de R_{max} e R_{min} para tratar desta dificuldade. De forma a utilizar o R_{min} da esfera em que é testada a inclusão, conforme a equação 2.9;

$$\text{dist}(C_A, C_B) \leq R_{A,max} - R_{B,min} . \quad 2.9$$

Agora se utilizarmos o R_{min} da esfera menor, como proposto por Dong a inclusão é detectada. Porém esta técnica ainda apresenta algumas falhas, como por exemplo, no caso de uma esfera discreta e tridimensional de raio $\sqrt{14}$ ($R_{max}^2 = 14$ e $R_{min}^2 = 13$) e outra vizinha de raio $\sqrt{9}$ ($R_{max}^2 = 9$ e $R_{min}^2 = 8$). Mesmo utilizando o valor de R_{min} não se identifica a inclusão que sabe-se existir no domínio discreto como pode se observar na Figura 32.

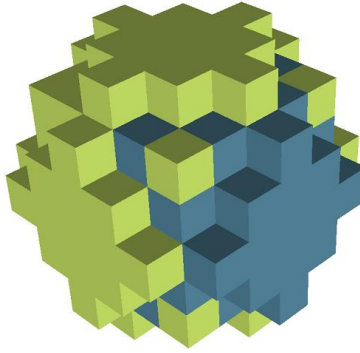


Figura 32 Esfera discreta com $R_{max}^2 = 9$ inclusa em uma esfera discreta de $R_{max}^2 = 14$

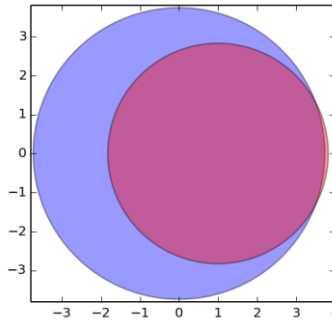


Figura 33 Em um domínio contínuo não se verifica a inclusão de uma esfera de raio $\sqrt{9}$ em uma de $\sqrt{14}$

Coeurjolly e Montavert (2007) propõem um algoritmo que extrai um conjunto de esferas máximas de maneira global, ao invés de realizar checagens para cada conjunto de duas esferas inscritas. Para tanto utilizam o conceito de esqueletização proposto por Saito e Toriwaki (1994) (utilizando parabolóides elípticos) e a transformada de distância euclidiana reversa.

2.3.2 Extração de Esferas Máximas com Parabolóides Elípticas

Saito e Toriwaki definiram para uma imagem 2D um esqueleto baseado em parabolóides. Cada parabolóide de centro (i, j) e altura $q(i, j)$ é definido pela equação:

$$0 \leq z < q(i, j) - (x - i)^2 - (y - j)^2. \quad 2.10$$

A interseção destes parabolóides com o plano $z = 0$ tem como resultado um círculo de raio $\sqrt{q(i, j)}$. Considerando um conjunto de $Q = \{q(i, j)\}$ onde cada valor representa o raio das esferas inscritas em (resultado da transformada de distâncias euclidianas). O esqueleto proposto por Saito e Toriwaki é definido pelo conjunto de parabolóides S_k tal que:

$$0 \leq z < q(i, j) - (x - i)^2 - (y - j)^2. \quad 2.11$$

O que em outras palavras, significa que o conjunto S_k é o subconjunto de parabolóides que compõem o envelope superior do conjunto de parabolóides que se obtém da transformada de distância euclidianas. Os elementos que formam as parábolas em S_k serão então as esferas máximas da imagem. Tomemos como exemplo apresentado na Figura 30. Podemos observar que a esfera B está completamente inclusa em A e C.

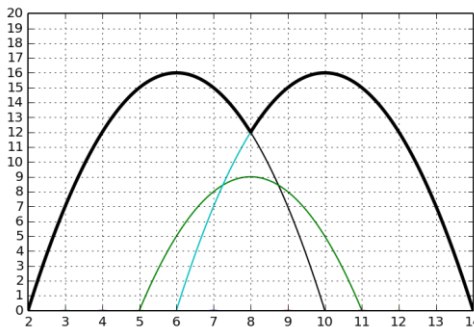


Figura 34 Envelope superior formado pelos paraboloides propostos por Saito e Toriwaki (1994) a partir exemplo da Figura 30

O que se comprova pelos parabolóides de altura correspondente aos seus valores de raio ao quadrado. Observamos na Figura 34 que o envelope superior é formado apenas pelos parabolóides A e B.

Esta explanação foi feita para uma imagem bidimensional. É necessário realizar uma terceira etapa análoga para que se trate de um volume tridimensional.

Apesar de solucionar os dois primeiros problemas apresentados, esta técnica ainda trata as esferas em domínio contínuo para identificar o conjunto de esferas máximas. Os autores propõem uma melhoria ao algoritmo apresentado acima utilizando o conceito de REDT

2.3.3 Transformada de distância euclidiana reversa (REDT - Reverse euclidian distance transformation)

Esta transformada tem como objetivo a reconstrução da imagem a partir de um conjunto de valores de distância euclidiana ao quadrado, que irá se comportar como um conjunto de raios de esferas discretas. A idéia é realizar isto de maneira global, ao invés de realizar o processo de "inflar" esferas discretas a partir dos seus valores de raio ao quadrado, o que também produziria o resultado desejado, porém, exigiria mais tempo de processamento.

Para cada dimensão da imagem, se considera um conjunto de parábolas, da forma:

$$F(i) = f(x, j) - (i - x)^2. \quad 2.12$$

Reconstrói-se a imagem tomando como valores após a transformada, os valores correspondentes a cada posição do envelope superior formado pelo conjunto de parábolas para aquela linha.

Vamos desenvolver um exemplo para melhor compreensão do processo. Considerando a imagem bidimensional da Figura 35 (a). As figuras (b) e (c) demonstram as etapas a serem realizadas em cada dimensão para a reconstrução da imagem. Por fim em (d) é aplicado um threshold para que se obtenha a imagem binarizada reconstruída.

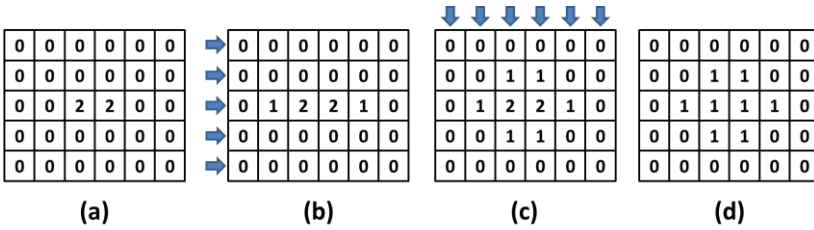


Figura 35 Reconstrução da imagem a partir de um conjunto de esferas máximas

Tomando como exemplo a transformada na direção x na linha contendo os valores $[0,0,2,2,0,0]$. As parábolas para esta linha podem ser observadas na Figura 36.

Pode-se extrair para cada posição da imagem o valor correspondente do envelope superior das parábolas: $[0,1,2,2,1,0]$. Este processo deve ser aplicado a cada linha para a transformada em x e para cada coluna na transformada em y . Para uma terceira dimensão, mais uma transformada desta natureza deve ser realizada

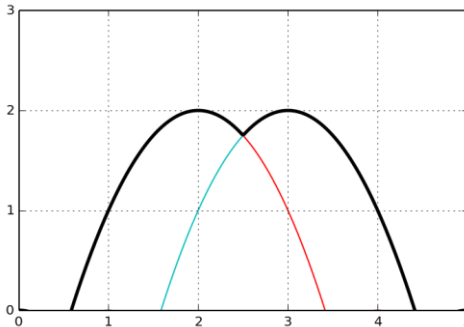


Figura 36 Parábolas formadas pelo algoritmo de REDT para reconstrução da imagem original

2.3.4 RDMA (*Reduced Discrete Medial Axis Extraction*)

O objetivo da Extração do Eixo Médio Reduzido (RDMA - Reduced Discrete Medial Axis Extraction) é realizar a extração das esferas máximas utilizando a mesma técnica de comparação dos parabolóides de Saito e Toriwaki porém considerando o domínio discreto ao invés do contínuo. Para tanto se utiliza parte do algoritmo do

REDT para se determinar os limites dos parabolóides de forma discreta. Não se determina o envelope superior como no REDT, mas se utiliza os valores para a parábola em cada posição da imagem e um threshold para se determinar os limites discretos das esferas.

Vamos tomar como exemplo o caso bidimensional da Figura 37, onde se tem em (a) todo o conjunto de esferas inscritas encontrado pela transformada de distância euclidiana ao quadrado (SDT). Em (b) é realizada a transformada em x e em (c) a transformada de y .

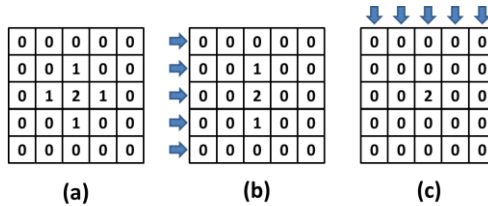


Figura 37 RDMA aplicado em um caso bidimensional com uma esfera de $R_{max}^2 = 2$ e quatro esferas de $R_{max}^2 = 1$ com centros afastados em um voxel

Tomando como exemplo a terceira linha da transformada em x : Se for empregada a técnica de parabolóides e utilizando seus limites em domínio contínuo, as inclusões não seriam detectadas. Agora, quando se utiliza o algoritmo de REDT para a determinação dos limites, é possível identificar as inclusões no domínio discreto.

A Figura 38 mostra os parabolóides gerados pela linha $[0,1,2,1,0]$ e também os limites em domínio discreto são apresentados como segmentos da mesma cor para cada esfera.

Sabe-se que o caso citado pode ser contornado utilizando, por exemplo, a técnica apresentada por Dong de utilizar R_{max} das esferas maiores e R_{min} das menores. Porém, a Figura 38 mostra que o RDMA é efetivo mesmo no caso de exemplo de uma esfera de raio 14 e outra de raio 8 com distância de 1 entre seus centros. Pode-se observar ainda pela figura que caso fosse utilizado o algoritmo puro de Saito e Toriwaki dos parabolóides, este também não seria capaz de identificar a inclusão. É necessário utilizar a técnica empregada no REDT para identificar os limites no domínio discreto.

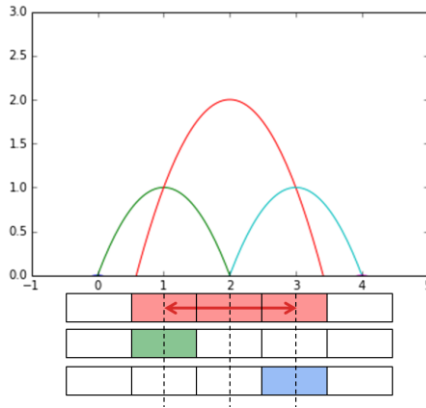


Figura 38 Demonstração da determinação dos limites das esferas discretas pelo RDMA para o exemplo da Figura 31

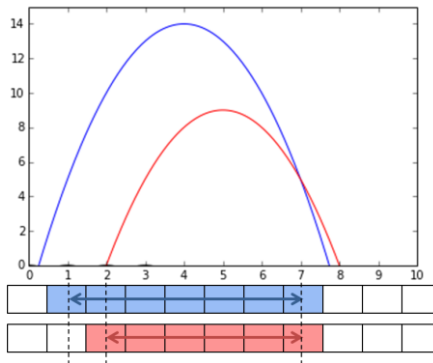


Figura 39 Demonstração da determinação dos limites das esferas discretas pelo RDMA para o exemplo da Figura 32

2.4 Aglomeração (Clustering)

Clustering, ou aglomeração, é a primeira etapa a ser realizada no processo de identificação de poros e ligações. Os poros e gargantas são definidos pelo agrupamento de diferentes conjuntos das esferas máximas encontradas. A etapa de Clustering busca encontrar e estabelecer relações entre as esferas máximas que se intersectem ou sejam adjacentes. Com isso será possível determinar se uma esfera faz parte de um poro ou garganta de acordo com critérios que logo serão apresentados.

A interseção de uma esfera A e B é dada pela inequação:

$$\text{dist}(C_A, C_B) \leq R_{A_{\max}} - R_{B_{\max}} . \quad 2.13$$

A metodologia empregada para o Clustering neste trabalho é baseada na concepção de Dong (Dong 2008), que utiliza o conceito de uma árvore genealógica. Dessa forma, são atribuídas duas novas propriedades às esferas: Um número de geração e um “nome de família”.

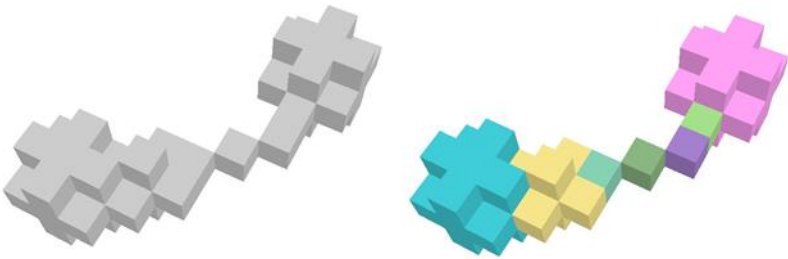


Figura 40 À esquerda a representação de um espaço poroso pelos *voxels* vazios e à direita as sete esferas máximas discretas encontradas pelo método (apresentadas cada uma com uma cor diferente)

As maiores são tratadas como os ancestrais de geração 1 e dão nome a uma família. Este nome de família é passado adiante para as esferas que a intersectem que serão definidas então como filhas diretas dos ancestrais e são classificadas como de geração 2. Todas as esferas são então visitadas dessa maneira: Se analisam as esferas intersectantes e o nome de sua família é passado adiante para as que tenham uma geração mais nova ou ainda não tenham sido visitadas. A priori todas as esferas são classificadas como pertencentes ao poro formado pelo seu respectivo ancestral. Por fim desta etapa, as esferas que forem encontradas que possuam mais de um nome de família serão classificadas como garganta. Tendo como característica ser uma conexão entre os ancestrais de cada família.

Para melhor entendimento, vamos tomar como exemplo o espaço poroso tridimensional encontrado na Figura 40. Nele foi realizado o processo de construção das esferas inscritas e remoção de inclusões,

terminando por conter as sete esferas máximas apresentadas com uma cor diferente para cada uma.

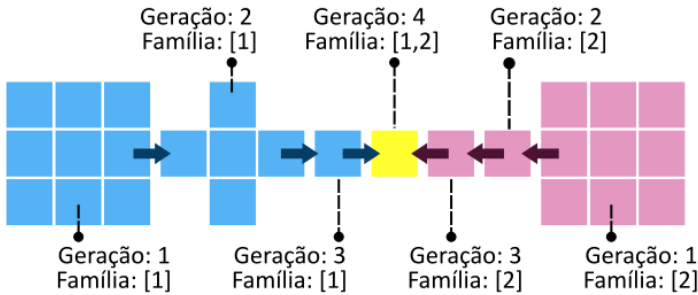


Figura 41 Representação da etapa de *Clustering*: São estabelecidas relações de "parentesco" a partir das duas esferas ancestrais e se encontra uma garganta

Ao iniciar a etapa de *Clustering*, são identificadas as esferas das extremidades de cor azul (cujo nome de família será 1) e rosa (com nome de família de 2) na figura como as ancestrais de geração 1, que possuem $R_{\max}^2 = 2$. Assim, seus nomes de família são passados às esferas vizinhas adjacentes que terão sua geração um grau maior que seu respectivo 'pai'. Isto é realizado consecutivamente até que todas as esferas tenham sido visitadas. A Figura 41 mostra uma representação da árvore genealógica criada.

Ao final do processo é identificado que a esfera central possui dois ancestrais e é então identificada como uma garganta que ligam os poros dos ancestrais da família 1 e 2. Assim, terminado o *Clustering*, nos encontramos com dois poros, contendo três esferas máximas cada um e uma garganta com uma esfera máxima representada com uma cor amarela na Figura 42.

2.4.1 Algoritmo de Clustering

Esta seção irá então sintetizar o procedimento de *Clustering* ou aglomeração

1. A todas às esferas é atribuída uma geração de valor infinito (para fim de implementação é utilizado o maior número inteiro do sistema).

2. As esferas são organizadas em grupos de esferas de mesmo tamanho. Começa-se então a visitar as esferas de cada grupo, começando pelo grupo de raios maiores até o grupo de esferas de menor raio existentes.
3. Ordenam-se as esferas não visitadas de acordo com a sua geração e analisa-se a primeira esfera desta lista: S_i . Caso a esfera ainda não tenha sido visitada (verifica-se se a esfera ainda tem a geração infinita) é dado a ela a geração 1 o que significa que esta esfera é um 'ancestral' de uma família. É verificado se existem esferas vizinhas S_j que se intersectam ou são adjacentes.
4. Caso S_j tenha uma geração maior ou igual que a de S_i (o que significa ou que S_j ainda não foi visitada ou que é da mesma geração ou mais nova que S_i) é estabelecida uma relação de parentesco de S_i para S_j . Caso S_j tivesse ainda a geração de valor infinito é atribuída uma geração de valor uma vez maior a de S_i e transmitido o nome da família do ancestral de S_i .
5. Repete-se o item 3 até que todas as esferas de mesmo raio do grupo sejam visitadas.
6. Repete-se o mesmo procedimento até que todos os grupos tenham todas as esferas visitadas.

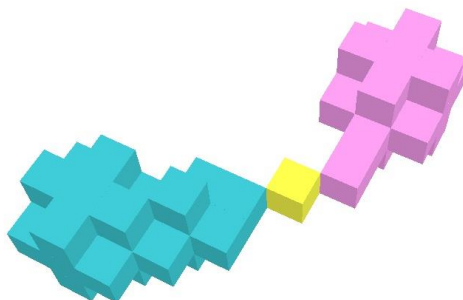


Figura 42 Representação dos *voxels* na etapa de *Clustering*. Ao fim desta etapa temos três esferas pertencentes ao poro 1, três esferas pertencentes ao poro 2 e uma esfera identificada como garganta

2.5 Expansão de gargantas

Como já explicado no capítulo 1, em uma rede de poros e ligações, o espaço poroso é segmentado em dois tipos de elementos. Os poros, que são caracterizados pelos espaços maiores entre os grãos e da matriz rochosa e as gargantas ou ligações, que são as aberturas alongadas que conectam dois ou mais destes poros. Desta forma tomando como exemplo o caso da Figura 42 uma garganta não poderia ser caracterizada com apenas uma esfera. Esta esfera inicial identificada como ligação é chamada de ‘semente’ da garganta.

Para que se capture a morfologia esperada da garganta é necessário que se identifique algumas das esferas que estão no caminho entre a semente e as esferas ancestrais como também pertencentes à ligação. A esta etapa é dado o nome de expansão de gargantas e ela será a responsável pela segmentação final do espaço poroso, ou seja, de identificação dos subconjuntos de esferas que possuam características de gargantas ou de poros.

Obrigatoriamente, as esferas ancestrais farão parte de poros e as ‘sementes’ que já apresentaram uma característica fundamental (possuem uma ligação com mais de uma esfera ancestral) farão parte da garganta.

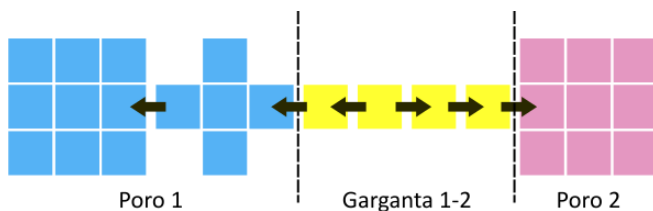


Figura 43 Representação de expansão de uma garganta

Todas as esferas que se encontrem entre esta semente e seus ancestrais serão candidatas à classificação de gargantas, porém parte delas irá constituir o volume dos poros e o restante da garganta. A identificação desta interface pode ser talvez detectada numa análise visual, mas como desenvolver um algoritmo que possa realizar esta distinção? É necessário que se adote um critério de escolha.

O critério escolhido é chamado de fator de expansão (E_f): a razão entre o R_{\min} da esfera sendo analisada e a diferença entre o R_{\min}

da esfera ancestral e da garganta. Sendo assim, determinada esfera de raio $R_{i,min}$ será classificada como garganta caso seu fator de expansão seja menor que um determinado valor máximo estipulado:

$$\frac{R_{i,min}}{R_{a,min} - R_{g,min}} < E_{fmax}, \quad 2.14$$

sendo $R_{a,min}$ e $R_{g,min}$ o R_{min} raio da esfera ancestral e da garganta respectivamente. Foi escolhido um E_{fmax} de 0.7, baseado nos trabalhos de Dong, (Dong 2008) e Silva (2012).

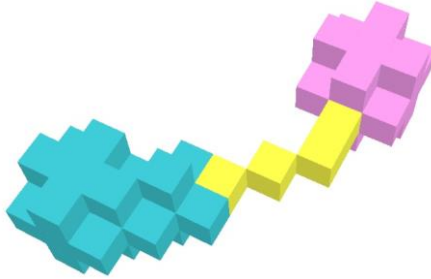


Figura 44 Representação dos voxels na etapa de expansão das gargantas.

Por fim, duas esferas máximas irão compor o poro 1, enquanto uma esfera compõe o poro 2 e quatro esferas definem a garganta entre os dois poros

A fim de melhor ilustrar a expansão, retornemos ao exemplo apresentado na seção anterior. Partindo da semente de garganta representada pela esfera em amarelo na Figura 42, são traçados dois caminhos na direção das esferas ancestrais 1 e 2. Portanto para este caso temos: $R_{a,min} = \sqrt{2}$ e $R_{g,min} = 0$. Observa-se que as esferas de $R_{min} = 0$, são classificadas como gargantas já que possuem um fator de expansão igual a 0. Já a esfera com $R_{min} = 1$, possui um fator de expansão de aproximadamente 0.71, maior que o critério adotado de 0.7. Esta esfera, de acordo com o critério escolhido, não é uma garganta e irá compor o volume do poro 1 da rede.

Uma vez que todas as gargantas tiverem sido visitadas a etapa é concluída e neste momento todas as esferas encontradas (e

consequentemente todos os voxels da imagem) irão fazer parte de um determinado poro ou alguma ligação, com isto tem-se identificado todos os elementos pertencentes à rede.

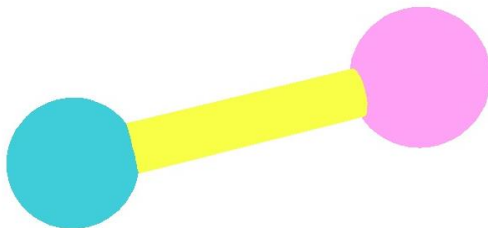


Figura 45 Rede final com estruturas porosas aproximadas para elementos geométricos mais simples (esferas para poros e cilindros para as ligações)

Para concluir a extração, os elementos da rede são aproximados para formas geométricas de menor complexidade. A Figura 45 apresenta a rede extraída para o pequeno exemplo que vem sendo utilizado para exemplificar as etapas do algoritmo. Para o exemplo citado são utilizadas formas esféricas para os poros e cilíndricas para as ligações, no capítulo 3.2 serão apresentados os elementos para os quais serão aproximados as estruturas porosas originais da rede e o conceito de fator de forma.

A Figura 46 apresenta a extração de um único conjunto poro-garganta-poro, como no exemplo prévio, com estruturas encontradas em um caso real a fim de demonstrar a complexidade das formas existentes.



Figura 46 Extração de um conjunto poro-garganta-poro encontrado em um caso real

A Figura 47 apresenta uma região de 100^3 voxels de uma imagem binarizada da amostra e a rede correspondente, obtida com o algoritmo apresentado neste capítulo. Com uma imagem deste tamanho é possível

inspecionar o comportamento do método de extração, observando se as regiões de maior afastamento entre a matriz rochosa é corretamente identificada como poro e se a conectividade entre estas regiões é preservada através das ligações.

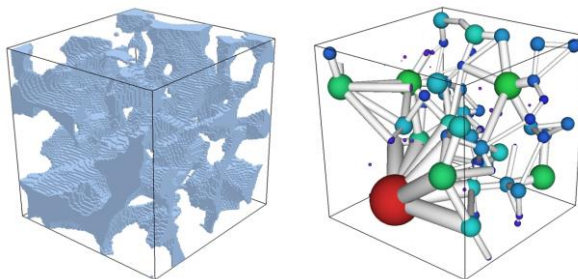


Figura 47 Extração de uma rede de poros e ligações de uma imagem binarizada de 100^3 voxels utilizando o algoritmo apresentado neste trabalho

2.6 *Spatial Hash* (Mapa espacial)

Durante o estágio de aglomeração das esferas máximas, uma vez que se visita uma das esferas (digamos a esfera S_A), é necessária a busca de todas as outras esferas que intersectem ou estejam adjacentes a ela. Isto é feito para que se passe o nome da família para esferas não visitadas, ou de geração maior. Esta busca por esferas adjacentes pode se tornar um processo bastante custoso, uma vez que se realiza o teste com a inequação 2.14 para todas as esferas máximas existentes. Sendo que muitas delas estariam claramente afastadas demais da esfera S_A e não precisariam passar pelo cálculo de adjacência.

Para contornar esta situação foi implementado um *Spatial Hash*, que se trata de uma extensão em duas ou três dimensões de uma tabela Hash. O princípio consiste em dividir o domínio em “células” menores, contendo menos voxels. Por exemplo, uma imagem com dimensões de 100^3 voxels, poderia ser dividida em 125 células de 20^3 voxels cada, por exemplo. Em seguida, as esferas são cadastradas em cada célula da qual faça parte. Desta forma, quando for realizada a procura por esferas adjacentes para determinada esfera (S_A) por exemplo, primeiro se verifica quais são as células das quais esta esfera faz parte. O critério adotado para considerar que uma esfera faça parte de uma célula é o seu

R_{max} . Na sequência, são analisadas apenas as esferas que estejam presentes nestas células do *Spatial Hash*.

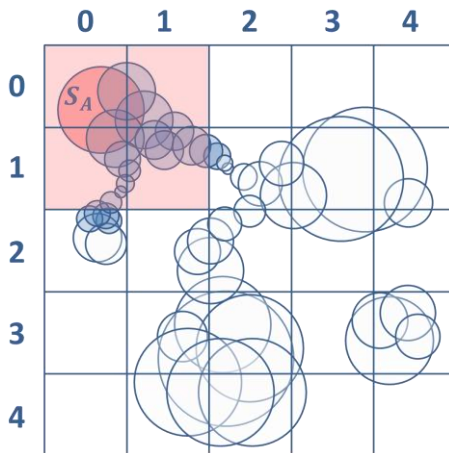


Figura 48 Representação da utilização de um Spatial Hash para encontrar as esferas adjacentes à esfera S_A

Para o exemplo da esfera S_A da Figura 48, na busca por esferas adjacentes serão analisadas apenas as esferas que intersectem as células (0,0), (0,1), (1,0) e (1,1). Este exemplo trata de um domínio bidimensional e as esferas representadas de forma contínua apenas para fins ilustrativos.

2.7 Parâmetros geométricos e topológicos da rede de poros e ligações

2.7.1 Raio dos Poros e Gargantas

O tamanho dos poros é definido pelo raio de sua esfera ancestral. E o raio da ligação é definido pelo raio da esfera ‘semente’ daquela garganta que deu origem à ligação.

Esta abordagem é semelhante à escolhida por Dong (Dong 2008). Já a abordagem utilizada por Al-Kharusi (2007) considera que o raio do poro seja igual ao de uma esfera que possua o mesmo volume da forma irregular original do poro. O mesmo processo é aplicado à garganta e seu volume original, mas a geometria utilizada para o cálculo do raio é um cilindro.

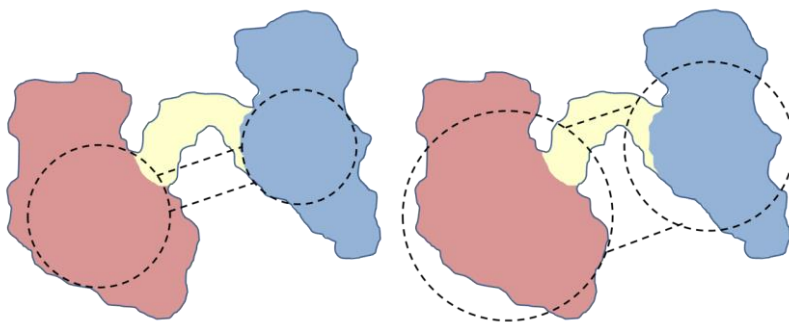


Figura 49 Comparação da rede gerada utilizando a metodologia de Dong (à esquerda) e Al-Kharusi (à direita) para o cálculo de raio dos poros e ligações

O que se observa na literatura e durante a implementação da extração da rede, é que o tamanho de poros e gargantas encontrados com esta abordagem provoca resultados de permeabilidade superestimados para a amostra. Uma vez que a grande irregularidade dos poros e ligações irá acarretar em valores elevados de raios para poros e gargantas. Isso resulta em uma alta transmissibilidade de fluido nestes elementos. Uma segunda consequência é a diminuição do comprimento das gargantas, que tem um papel importante na resistência ao escoamento oferecido pela rede.

Para se evitar a descontinuidade em resultados que dependam diretamente do tamanho das gargantas e poros (como a curva de pressão capilar), sugere que se adote uma distribuição entre os valores de R_{\min} e R_{\max} para os valores da esfera ancestral para os poros e para a 'semente' das gargantas no caso das ligações. Este valor é finalmente multiplicado pelo tamanho do voxel da imagem da qual foi extraída a rede, resultando em uma unidade de comprimento.

2.7.2 Volume

O volume dos poros e gargantas é definido pela contagem dos voxels das esferas que compõem o determinado elemento, eliminando-se as redundâncias. É utilizado o tamanho do voxel na imagem para obtermos volumes na unidade de μm^3 .

2.7.3 Área Superficial

A área superficial é computada somando as faces dos voxels vazios que estão em contato com voxels de grãos. A área superficial será utilizada para o cálculo da resistência hidráulica dos elementos. É utilizado o tamanho do voxel imagem para obtermos valores na unidade de μm^2 .

2.7.4 Poros de Fronteira

Para que se possa calcular a porosidade efetiva de uma amostra e para que se realize a simulação de fluxo através da rede, é necessária a identificação dos seus poros de fronteira.

Podem ser encontrados poros de fronteira de entrada e saída para cada direção cartesiana (a depender do tipo de imagem obtida da amostra, no caso de uma imagem de um plugue cilíndrico, os poros de fronteira ficam limitados à direção axial). Isto permite, por exemplo, cálculo de permeabilidades e porosidades com diferentes direções e um estudo de anisotropia da amostra. Os poros são considerados como poros de uma determinada fronteira se estiverem localizados a uma distância de 10% do comprimento total da imagem na direção da face de interesse.

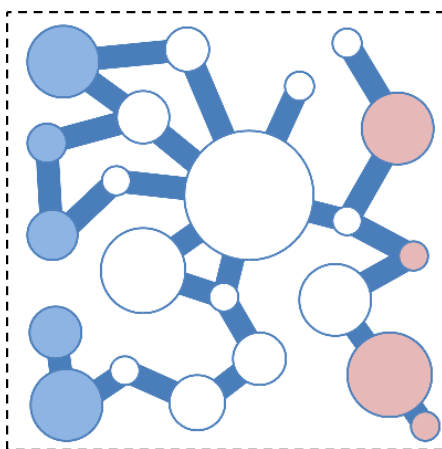


Figura 50 Representação da identificação dos poros de fronteira de uma rede

Como regra adotada por Al-Kharusi (2007), o número de poros de uma determinada fronteira não pode conter mais de 25% do número total de poros da rede. Isto é feito pois os poros de fronteira servirão

como condições de contorno para o modelo de escoamento, e um número muito pequeno de poros de interior prejudicaria a representatividade da rede. Caso isso aconteça serão removidos os poros mais afastados até que o critério seja respeitado. A Figura 50 mostra a representação da identificação de poros de fronteira em uma rede.

3 PROPRIEDADES PETROFÍSICAS

3.1 Propriedades estáticas e descrição morfológica da amostra

Estas são as propriedades petrofísicas que podem ser extraídas da rede que não necessitam da modelagem de escoamento de fluidos e são dados intrínsecos da rede e dependem exclusivamente de sua geometria e topologia. São elas porosidade absoluta, porosidade efetiva e o histograma de algumas propriedades como tamanho dos poros, número de coordenação, comprimento das gargantas, etc.

3.1.1 Porosidade absoluta

Como apresentado no capítulo 1, a porosidade absoluta de uma amostra é a razão entre o volume poroso e o volume total ocupado pela rocha (incluindo poros e matriz sólida (equação 1.1)). Isto pode ser obtido através da razão entre o número de voxels de poro da imagem e o número total de voxels. Para esta propriedade em específico não é necessária a rede de poros e ligações caso se tenha em mãos a imagem utilizada para a extração da rede, já que ela pode ser obtida com uma simples contagem de voxels. A imagem binarizada pode ser reconstruída a partir da rede com as informações de suas esferas máximas

3.1.2 Porosidade efetiva

A porosidade efetiva é a razão entre o volume dos poros interconectados entre si e a fronteira da amostra pelo volume total da rocha. Esta propriedade pode ser calculada a partir da rede de poros e ligações, uma vez que ela guarda a informação de conectividade entre os poros. O procedimento consiste em realizar uma varredura a partir dos poros de fronteira de uma extremidade da rede (identificados de acordo com o item 2.7.4) até os poros de fronteira da outra, e identificar os poros que façam parte deste caminho. Por conta disso, normalmente esta propriedade será associada com uma determinada direção cartesiana da amostra. Caso a amostra seja um prisma, será possível calcular a porosidade efetiva nas três direções principais, tornando possível um estudo de anisotropia da rocha para esta propriedade. Caso a rede tenha sido extraída da imagem total de um *plugue*, e possua um formato cilíndrico, a porosidade efetiva será calculada na direção axial da amostra.

3.2 Propriedades petrofísicas de transporte

Para que se possa realizar estimativas de propriedades petrofísicas de transporte através de uma rede, é necessário o desenvolvimento de um modelo matemático que simule o escoamento de fluidos através dos poros e ligações. Este capítulo aborda a fundamentação teórica do modelo desenvolvido para o cálculo de permeabilidade absoluta das amostras.

O modelo utiliza as seguintes hipóteses:

- Fluido é newtoniano e incompressível
- O escoamento encontra-se em regime permanente
- O fluido é composto de apenas uma fase e com isso apresenta propriedades homogêneas
- O escoamento encontra-se em regime laminar
- São conhecidas as pressões nos poros de fronteira da rede

O objetivo do modelo é obter um sistema de equações que relacionem as pressões dos poros, tornando possível calcular a vazão de um poro a outro.

3.3 Geometria da rede e o conceito de fator de forma

Conforme descrito na última etapa do procedimento de extração de redes, seus elementos são aproximados para formas geométricas mais simples. Isto é realizado para que se possam utilizar expressões analíticas de escoamento de fluido no interior de dutos para descrever a vazão de um poro a outro da rede. Na modelagem matemática do escoamento de um único fluido (ou uma única fase do fluido) através da rede, é usual que se aproxime os poros por esferas e as ligações por formas cilíndricas.(Cunha 2012). Porém, como se sabe, o espaço poroso é bastante irregular em realidade. Isto traz influência direta na resistência hidráulica oferecida ao escoamento de fluidos em seu interior, e precisa ser levado em conta para que o modelo seja capaz de captar corretamente a transmissibilidade do meio.

Além disso, no caso do escoamento de dois ou mais fluidos imiscíveis, estas irregularidades juntamente com os efeitos de molhabilidade e forças capilares irão causar o surgimento de finas

camadas de fluido molhante na superfície da matriz rochosa. Este efeito é de grande importância para a predição de propriedades como permeabilidade relativa, pressão capilar, saturação residual e efeitos de histerese. Para contemplar estes fenômenos na modelagem de escoamento de fluidos em redes, é necessário que os elementos utilizados para aproximação do espaço poroso possuam cantos capazes de contemplar o efeito de aprisionamento de fluido.

De forma a incorporar estes efeitos, o método defendido por este trabalho irá realizar a aproximação das formas originais por prismas cuja seção transversal pode assumir três diferentes formas a depender da irregularidade apresentada pelo espaço poroso original: Circular, quadrada e triangular, sendo que a triangular pode ser subdividida ainda em forma de triângulos equiláteros ou uma forma triangular arbitrária, permitindo diferentes valores para seus ângulos internos.

A irregularidade de uma determinada forma geométrica pode ser expressa pelo conceito de fator de forma: Um número adimensional que correlaciona a área de uma determinada forma geométrica pelo seu perímetro (Mason e Morrow 1991):

$$G = \frac{A}{P^2} . \quad 3.1$$

Os valores de fator de forma para as seções utilizadas são apresentados na . Pode-se observar que para o caso da forma triangular o fator de forma é apresentado como um intervalo e valores variando desde $\sqrt{3}/36$ (para o caso de um triângulo equilátero) até 0 para o caso de um triângulo com dois dos ângulos internos igual a 0.

O objetivo é aproximar cada elemento da rede por um elemento cujo fator de forma seja semelhante ao da forma original. Deve-se, portanto calcular o fator de forma das estruturas que possuem uma geometria tridimensional e irregular. Uma das alternativas para calcular seu fator de forma é capturar diversas seções transversais ao longo de seu comprimento (Valvatne 2004) e realizar uma média. Neste trabalho prefere-se o uso de outra abordagem: Sendo L o comprimento deste elemento, tem-se ao multiplicar L^2 no numerador e denominador da

equação 3.1 uma expressão do fator de forma para um elemento volumétrico qualquer:

$$G = \frac{VL}{A_s^2}, \quad 3.2$$

sendo V correspondente ao volume e A_s a área superficial do elemento.

Tabela 1 Fatores de forma para as formas geométricas a serem utilizados pelos elementos da rede

Forma geométrica	Fator de forma
Circular	$\frac{1}{4\pi}$
Quadrada	$\frac{1}{16}$
Triangular	$\left\langle 0, \frac{\sqrt{3}}{36} \right]$

Ao se calcular o fator de forma para os elementos da rede, se utilizam os valores de volume e área superficial já calculados para cada poro e garganta. Para que se faça uso do fator de forma no cálculo de sua condutância hidráulica (como será apresentado nas seções seguintes) é importante que o comprimento L seja medido na direção de escoamento do sistema poro-garganta-poro.

Tendo calculado o fator de forma para cada elemento da rede, este será aproximado então por um prisma de seção constante, sendo a forma da seção igual à forma do elemento geométrico cujo fator de forma mais se aproxime do original. Da seguinte maneira: Os elementos da rede com fator de forma com valor igual ou superior à $1/4\pi$ são aproximados prismas de seções circulares (cilindros). Para elementos cujo fator de forma se encontre no intervalo de $\left(\frac{1}{16}, \frac{1}{4\pi}\right]$, a seção utilizada é a quadrada. Caso o fator de forma esteja no intervalo $\left(\frac{\sqrt{3}}{36}, \frac{1}{16}\right]$ a seção aproximada é um triângulo equilátero. E por fim caso o fator de

forma se encontre no intervalo $(0, \frac{1}{4\pi}]$, se aproxima a forma por um prisma com seção triangular de ângulos diferentes, cujo fator de forma será idêntico ao do elemento original. De forma que quanto menor o seu valor, mais fechados serão os valores dos ângulos internos. Como o escopo deste trabalho abrange a caracterização e propriedades que envolvem apenas escoamentos monofásicos, não será apresentados aqui o cálculo dos ângulos internos, área efetiva de escoamento e efeitos de forças capilares, visto que para escoamento monofásico se faz uso apenas do valor do fator de forma. A descrição destes termos pode ser encontrada nos trabalhos de Øren (1998) e Valvatne (2004).

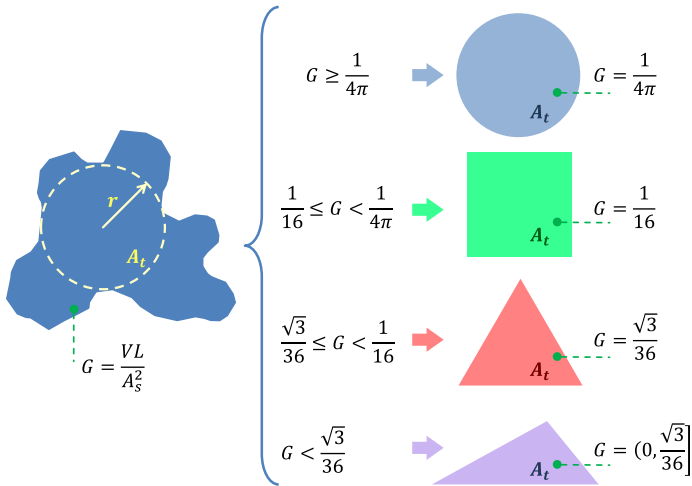


Figura 51 Aproximação da estrutura porosa original por elemento prismático cuja seção possua um fator de forma semelhante ao original

Para a área transversal dos elementos prismáticos, por consistência às definições de tamanho de poros e gargantas, faz-se uso da esfera ancestral dos poros e a maior esfera existente nas ligações. Esta área transversal é conservada, independente do elemento prismático a ser utilizado na transformação. Com esta abordagem as condutâncias hidráulicas (termo a ser esclarecido nas seções seguintes) dos elementos de seção quadrada e triangular apresentarão, nesta ordem, valores menores quando comparados aos elementos de seção circular. Desta forma quanto mais irregular for o elemento da rede, maior será sua resistência ao escoamento por conta do menor valor do fator de forma.

E sob o ponto de vista da presença de fluidos imiscíveis, quanto menor for o fator de forma da estrutura original, menores serão os ângulos internos das seções transversais dos elementos aproximados, proporcionando um maior aprisionamento de fluido molhante e uma área efetiva de escoamento menor.

As seções seguintes descrevem o desenvolvimento do modelo matemático, fazendo uso dos fatores geométricos aqui apresentados.

3.4 Conservação da massa

O ponto de partida da modelagem é a avaliação da equação da conservação da massa para um único poro da rede. Considerando as hipóteses citadas acima, a equação se resume à expressão 3.3.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{Q} = 0 \quad 3.3$$

Pode-se então escrever a conservação de massa para um poro i conectado a outros j poros de maneira discreta como na equação 3.4.

$$\sum_j Q_{ij} = 0 \quad 3.4$$

3.5 Equação da vazão em um sistema poro-ligação-poro

A rede de poros e ligações pode ser decomposta em diversos sistemas poro-ligação-poro. Para se calcular a vazão de um poro a outro, se utiliza da equação de Poiseulle para o escoamento no interior de dutos. Esta equação correlaciona a vazão volumétrica do fluido Q com a diferença de pressão existente de um ponto a outro ao longo de uma distância l com uma determinada condutância hidráulica γ .

$$Q = -\gamma \frac{\Delta P}{l} \quad 3.5$$

A condutância hidráulica leva em conta a geometria do meio e a viscosidade do fluido sendo transportado. Pode-se expressar a condutância hidráulica em uma forma generalizada utilizando o conceito de fator de forma G, apresentado na seção 3.3, como apresentado na equação:

$$\gamma = \alpha \frac{A^2 G}{\mu} . \quad 3.6$$

Desta forma- consegue-se descrever o escoamento em todos os elementos prismáticos da rede com uma única expressão. O parâmetro α assume valores de 1/2 para seção circular, 0.5623 para quadrada e 3/5 para seções triangulares. Observa-se que para o caso de uma seção circular, expandindo o fator de forma e o parâmetro α , a expressão 3.6 assume a forma da condutância hidráulica para escoamentos em dutos cilíndricos:

$$\gamma = \frac{\pi r^4}{8\mu} \quad 3.7$$

A Figura 52 apresenta um sistema poro-garganta-poro com as suas geometrias originais, obtidas diretamente da imagem e as propriedades geométricas de cada elemento utilizadas para calcular seus fatores de forma. Os fatores de forma para os poros e gargantas deste sistema podem ser descrito por:

$$G_i = \frac{V_i 2L_i}{A_i^s} \quad G_g = \frac{V_g L_g}{A_g^s} \quad G_j = \frac{V_j 2L_j}{A_j^s} \quad 3.8$$

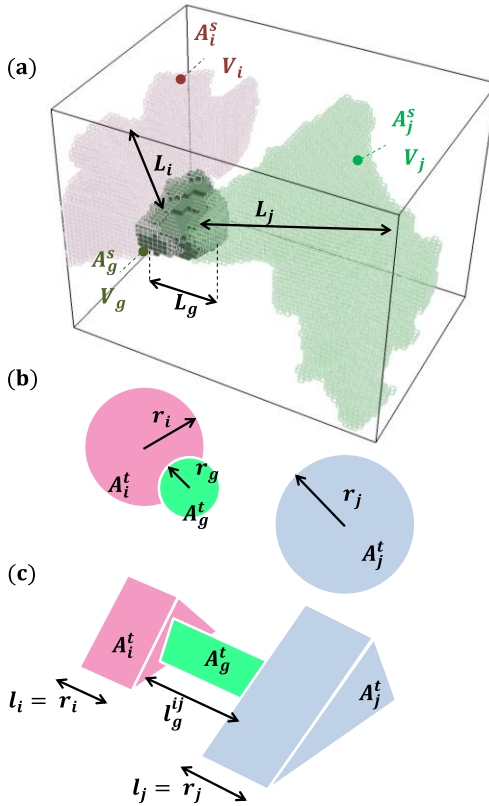


Figura 52 Estrutura porosa original de um sistema poro-garganta-poro e sua aproximação para elementos prismáticos

São representados também na Figura 52 em (b) as esferas ancestrais para os poros e a maior esfera existente na ligação, de onde se obtém o tamanho de cada elemento (r_i , r_g e r_j) e as áreas transversais à direção de escoamento (A_i^t , A_g^t e A_j^t). Em (c) são representadas as formas geométricas para a qual cada elemento será aproximado. Desta forma, pode-se calcular a condutância hidráulica para cada componente do sistema pelas expressões:

$$\gamma_i = \alpha_i \frac{A_i'^2 G_i}{\mu} \quad \gamma_g = \alpha_g \frac{A_g'^2 G_g}{\mu} \quad \gamma_j = \alpha_j \frac{A_j'^2 G_j}{\mu} . \quad 3.9$$

Utilizando-se o conceito de analogia com um sistema elétrico, pode se escrever a equação 3.5 para todo o sistema poro-ligação-poro em função de uma resistência hidráulica equivalente na forma:

$$Q = -\Omega_{eq}^{-1} \Delta P . \quad 3.10$$

A resistência equivalente é definida pela expressão

$$\Omega = \frac{l_i}{\gamma_i} + \frac{l_g^{ij}}{\gamma_g^{ij}} + \frac{l_j}{\gamma_j} . \quad 3.11$$

Aplicando a equação 3.12 na conservação de massa de um poro teremos:

$$\sum_j -\Omega_{i,j}^{-1} \Delta P_{i,j} = 0 \quad 3.12$$

3.6 Sistema de equações para pressão nos poros

Realizando a conservação e massa para cada poro, teremos então um sistema de equações lineares correlacionando todos os poros da rede. Assumindo como condição de contorno as pressões prescritas de entrada e saída para os poros de fronteira, o sistema tem solução única.

$$\left[\Omega^{-1} \right]_{n \times n} \left[\Delta P \right]_{n \times 1} = \left[0 \right]_{n \times 1} \quad 3.13$$

3.7 Exemplo

Tomemos como exemplo a pequena rede apresentada na Figura 53. Teremos um sistema de cinco equações, contendo duas condições de contorno de Dirichlet, com valor prescrito para pressão nos poros 1 e 5

(P_{entrada} e $P_{\text{saída}}$). Existem nesse sistema três incógnitas, os valores de pressão para os poros 2,3 e 4.

Equação para poro 1

$$P_1 = P_{\text{entrada}} \quad 3.14$$

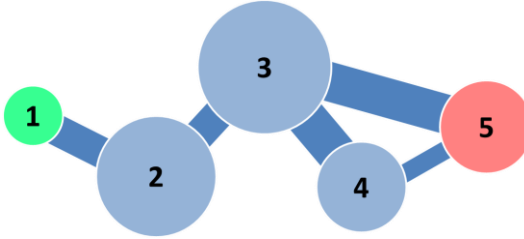


Figura 53 Exemplo de uma pequena rede para montagem do sistema de equações de pressões nos poros

Equação para poro 2

$$\Omega_{12}\Delta P_{12} + \Omega_{23}\Delta P_{23} = 0$$

$$\Omega_{12}(P_2 - P_1) + \Omega_{23}(P_3 - P_2) = 0 \quad 3.15$$

$$P_2(\Omega_{12} - \Omega_{23}) - P_1\Omega_{12} + P_3\Omega_{23} = 0$$

Equação para poro 3

$$\Omega_{2,3}\Delta P_{2,3} + \Omega_{3,4}\Delta P_{3,4} + \Omega_{3,5}\Delta P_{3,5} = 0$$

$$\Omega_{2,3}(P_3 - P_2) + \Omega_{3,4}(P_4 - P_3) + \Omega_{3,5}(P_5 - P_3) = 0 \quad 3.16$$

$$P_3(\Omega_{2,3} - \Omega_{3,4} - \Omega_{3,5}) - P_2\Omega_{2,3} + P_4\Omega_{3,4} + P_5\Omega_{3,5} = 0$$

Equação para poro 4

$$\Omega_{3,4}\Delta P_{3,4} + \Omega_{4,5}\Delta P_{4,5} = 0$$

$$\Omega_{3,4}(P_4 - P_3) + \Omega_{4,5}(P_5 - P_4) = 0 \quad 3.17$$

$$P_4(\Omega_{3,4} - \Omega_{4,5}) - P_3\Omega_{3,4} + P_5\Omega_{4,5} = 0$$

Equação para poro 5

$$P_5 = P_{saída} \quad 3.18$$

Este sistema de equações pode ser expresso na sua forma matricial. Ao se resolver este sistema, são obtidas as pressões nos poros 2, 3 e 4.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\Omega_{12} & \Omega_{12} - \Omega_{23} & \Omega_{23} & 0 & 0 \\ 0 & -\Omega_{23} & \Omega_{23} - \Omega_{34} - \Omega_{35} & \Omega_{34} & \Omega_{35} \\ 0 & 0 & -\Omega_{34} & \Omega_{34} - \Omega_{45} & \Omega_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{in} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P_{out} \end{bmatrix} \quad 3.19$$

3.8 Permeabilidade absoluta

Uma vez obtido a distribuição de pressão em cada poro da rede, preenchida com um único fluido e decorrente da diferença de pressão aplicada em duas de suas fronteiras, é possível calcular a vazão de um poro qualquer da rede à outro a partir da equação 3.10. Desta forma pode-se calcular a vazão total de fluido escoando através da rede se for realizado um somatório das vazões que deixam os poros de fronteira de entrada ou saída. Com isto, se tem em mãos todas as variáveis necessárias para o cálculo da permeabilidade absoluta a partir da equação 3.20.

$$K = \frac{Q\mu L}{A\Delta P} \quad 3.20$$

A diferença de pressão (ΔP) é aquela aplicada nas fronteiras de entrada e saída da rede (as mesmas utilizadas como condição e contorno), assim como a viscosidade do fluido (μ) serve de parâmetro de entrada para o cálculo das condutâncias hidráulicas. A área (A) é aquela correspondente à uma seção transversal da amostra de acordo com a direção do escoamento, obtida através da imagem e associada a uma das faces da imagem que possui os poros de fronteira de entrada ou saída. A orientação das fronteiras escolhidas para o escoamento também definirá o comprimento (L): uma das dimensões da imagem correspondente à direção do escoamento. Caso a imagem tenha sido recortada como um prisma, pode se utilizar diferentes orientações para o fluxo através da rede e conseqüentemente é possível obter valores de permeabilidade nas três direções cartesianas (K_x , K_y , K_z). Muitas vezes a imagem da qual a rede é extraída compreende todo o corpo da amostra. Nestes casos, devido à geometria cilíndrica se calcula a permeabilidade apenas na direção axial da amostra. A área e o comprimento podem ser obtidos a partir da imagem original e do tamanho do voxel da imagem adquirida.

3.9 Curva de pressão capilar

A porosimetria com intrusão de mercúrio (PIM) é uma técnica experimental empregada para a caracterização de amostras de meios porosos. Através dela podem se obter propriedades como porosidade efetiva, distribuição de tamanho de poros e curvas de pressão capilar entre outras. Os ensaios com mercúrio têm sido bastante empregados pelo fato deste material ser não molhante à maioria das substâncias, desta forma não penetra espontaneamente nos poros por ação capilar.

No experimento, a amostra da rocha é fechada em um penetrômetro, um recipiente conectado a um capilar, e submetida ao vácuo. O penetrômetro é preenchido com mercúrio e é então submetido a incrementos gradativos de pressão, fazendo com que o mercúrio invada os poros da amostra. Isto irá fazer com que o nível de mercúrio no capilar diminua

Na seção 1.2.4 foi apresentada a equação 1.17 para um modelo de tubo capilar. Esta equação é um caso especial da equação de Young-

Laplace, que para a situação de mercúrio em fase líquida e vapor pode ser escrita como:

$$P_{Hg}^L - P_{Hg}^V = \sigma_{Hg} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad 3.21$$

Onde P_{Hg}^L e P_{Hg}^V correspondem à pressão do mercúrio na fase líquida e de vapor respectivamente. Admitindo que o menisco é esférico pode se escrever:

$$\begin{cases} r = R_1 = R_2 = r_c \cos \theta \\ P_c = P_{Hg}^L - P_{Hg}^V \end{cases} \quad 3.22$$

Desta forma chega-se a equação 1.17. No início do experimento, o mercúrio preenche apenas os poros de maior diâmetro. À medida que se aumenta a pressão os poros de menores também são invadidos pelo mercúrio. Conhecida a geometria do penetrômetro e o nível de mercúrio sabe-se quanto de volume poroso da amostra foi preenchido. Estes valores são guardados e através dos mesmos pode-se construir uma curva de pressão capilar.

Ao fim do experimento, com todo o espaço poroso da rocha preenchido pelo mercúrio, é possível calcular a porosidade efetiva da amostra (conhecido o volume total da amostra e do mercúrio injetado). Sendo assim a curva de pressão capilar também pode ser escrita em termos de saturação, ao invés de volume, como é normalmente disposta.

Pode-se simular a intrusão de mercúrio utilizando-se a rede de poros e ligações. Para isso se faz mais uma aproximação, ao se negligenciar a pressão de vapor de mercúrio (P_{Hg}^V). Desta forma considera-se o valor de pressão capilar igual à pressão aplicada ao mercúrio em fase líquida. Pode-se então calcular um valor de raio mínimo para os elementos da rede que permitem a entrada de mercúrio para uma determinada pressão.

$$r = \frac{P_{Hg}^L}{2\sigma_{Hg} \cos \theta} \quad 3.23$$

Tal qual o experimento, aumenta-se gradativamente a pressão aplicada à fase líquida do mercúrio, de forma que a cada passo mais elementos serão preenchidos. Para que um elemento da rede seja preenchido, este deve estar em um caminho poroso que conecte as duas fronteiras da direção de intrusão do mercúrio (de forma que possa haver deslocamento do fluido na fase vapor para fora da amostra), isto é obtido utilizando-se os dados de porosidade efetiva.

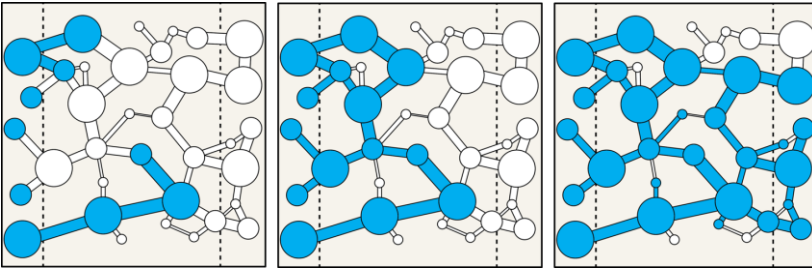


Figura 54 Representação da intrusão de mercúrio em uma rede com aumento gradativo da pressão de fase líquida do mercúrio

4 CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS: MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as amostras para a caracterização petrofísica, os processos de preparação das amostras, aquisição das imagens, as metodologias experimentais e numéricas que serão utilizados para comparação de resultados com a caracterização obtida com a rede.

4.1 Amostras

Foram utilizadas cinco amostras de rochas siliciclásticas para se realizar a caracterização. Estas rochas foram fornecidas pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES) – Petrobras e fazem parte do banco de dados do LMPT/UFSC. Normalmente as amostras chegam ao laboratório (no caso ao CENPES/Petrobras) na forma de testemunhos, amostras retiradas da formação rochosa de interesse durante a perfuração de um poço. São retiradas então sub-amostras destes testemunhos, são os chamados plugues: Amostras cilíndricas com cerca de 3,5 cm de diâmetro e 4,5 cm de comprimento. A depender do método a ser utilizado na aquisição das imagens os plugues passam por tratamentos específicos, desde a limpeza até cortes em novas sub-amostras ou lâminas delgadas.

As amostras serão denominadas na forma de seus acrônimos de acordo com tipo da rocha de onde o testemunho foi extraído, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 Denominação das amostras a serem caracterizadas de acordo com sua origem

Abreviação	Tipo da rocha
BS	Bentheimer Sandstone
BBS	Buff Berea Sandstone
GBS	Grey Berea Sandstone
IBS	Idaho Brown Sandstone
IGS	Idaho Grey Sandstone

4.2 Microtomografia

Para se realizar a aquisição de imagens por meio da tomografia, as amostras devem estar na forma de plugues ou ainda de sub-volumes. A depender da resolução que se deseja utilizar na aquisição e das limitações do microtomógrafo a ser utilizado. Para se adquirir imagens de maior resolução normalmente se extraem sub-amostras do plugue (Figura 55).

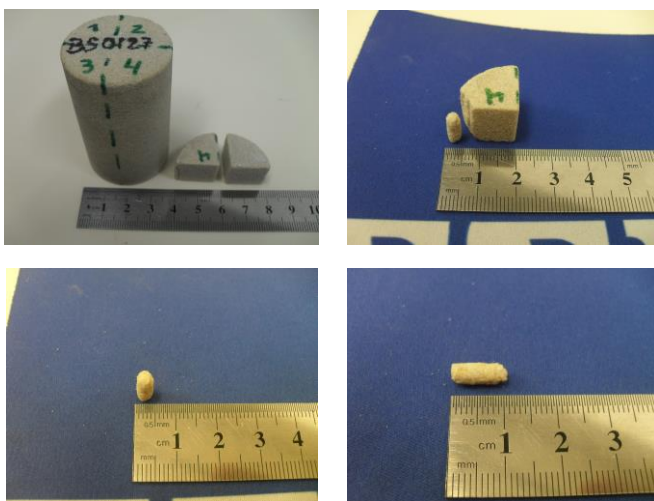


Figura 55 Plugue da amostra BS e as sub-amostras retiradas para aquisição das imagens por tomografia. Material cedido pelo LMPT

A escolha da resolução espacial tem grande influência nos resultados. Uma resolução alta permite a captura mais detalhada de microestruturas porosas que não estariam visíveis em uma resolução menor. Porém, isso faz com que o volume capturado seja menor. No caso de uma rocha de características heterogêneas isto tornaria a imagem menos representativa. Nestes casos, uma técnica que vem sendo explorada é a aquisição de imagens em diferentes resoluções de uma mesma amostra. O objetivo é capturar as diferentes escalas espaciais do sistema poroso existente nas rochas carbonáticas. Através destas diferentes imagens é construída uma rede multi-escala (Mantovani 2013), (Kronbauer 2014) de forma estocástica a partir de redes extraídas para cada escala individual.

Para este trabalho, tendo em vista a natureza relativamente homogênea dos arenitos, pode-se conseguir uma boa representatividade com uma única resolução espacial. A Figura 56 apresenta seções transversais das imagens adquiridas. Estas imagens são apresentadas em tons de cinza, de forma que a fase porosa é representada pelos tons mais escuros enquanto a fase sólida, pelos tons mais claros. A Tabela 3 apresenta a resolução das imagens adquiridas com o tamanho de voxel utilizado para cada uma das amostras.

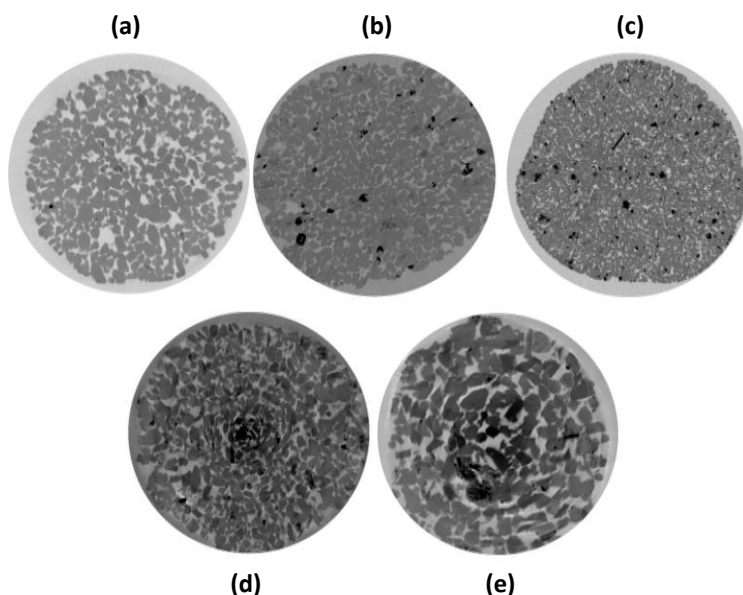


Figura 56 Seções transversais em tons de cinza das imagens adquiridas de cada amostra

As imagens das amostras foram adquiridas pelo LMPT/UFSC por meio do microtomógrafo Zeiss, modelo VersaXRM-500. Todas as imagens utilizadas neste trabalho foram adquiridas pela Dra. Eng. Iara F. Mantovani, atualmente pós-doutoranda no LMPT, e/ou pelo pesquisador Dr. Eng. Anderson Camargo Moreira, atual técnico responsável pelos equipamentos de tomografia no LMPT. Ambos desenvolvem pesquisas na área de análise de imagens, trabalhando

diretamente na aquisição de imagens e caracterização de meios porosos (Mantovani, 2013; Moreira, 2013).

Em seguida foi selecionada uma região de interesse (*ROI – Region of interest*) de 500³ voxels para ser realizada a análise, da qual será extraída a rede de poros e ligações.

Tabela 3 Resolução utilizada na tomografia de cada amostra

Amostra	Tamanho do voxel
BS	4.8 μm
BBS	5.2 μm
GBS	1.68 μm
IBS	5.3 μm
IGS	5.0 μm

4.3 Processamento das imagens

Com as imagens em mãos os próximos passos envolvem o tratamento e binarização das mesmas. O tratamento é realizado por meio da aplicação de alguns filtros. O objetivo é eliminar imperfeições ou ruídos da imagem que acarretariam em um maior tempo de processamento nas etapas de análise (isto significa que para a extração a rede uma quantidade menor de esferas máximas poderia ser utilizada para representar todo o espaço poroso). Isto foi realizado com a utilização de um filtro da mediana nas imagens.

Na etapa seguinte é realizada a binarização da imagem, que como apresentado na seção 1.3.2 consiste na segmentação da imagem nas fases sólida e porosa. Para isto é necessário que se escolha um valor de *threshold* dentre os tons de cinza apresentados na imagem para diferenciar estas duas fases. Este valor pode ser obtido através de um algoritmo que analise o histograma de tons de cinza da imagem (Gonzales-Barron e Butler 2006), ou ainda escolhido manualmente por quem estiver estudando a amostra. A utilização de mecanismos de automatização da escolha de valores para o *threshold* ainda que apenas como uma primeira sugestão ao operador vem se tornando uma prática comum nesta etapa de processo (Cunha et al. 2012). A etapa de binarização é de grande importância para a caracterização por meio de análise de imagens, uma vez os resultados serão prejudicados caso a imagem binarizada não seja representativa.

A Figura 57 apresenta as regiões de interesse para as cinco amostras já binarizadas, sendo o espaço poroso representado pela cor preta e a fase sólida representada pela cor branca.

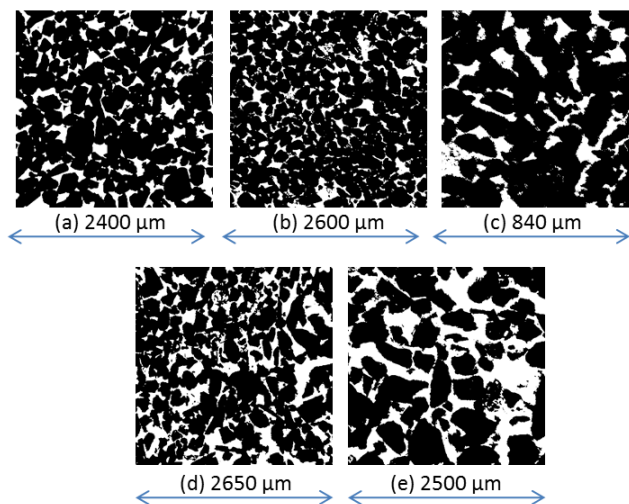


Figura 57 Seções binarizadas das regiões de interesse das amostras.

Todos os volumes são cúbicos com 500 voxels em cada direção. É apresentada a medida de comprimento de cada amostra (a) BS, (b) BBS, (c) GBS, (d) IBS e (e) IGS

De posse da imagem binarizada, pode-se iniciar a caracterização por meio das técnicas de análise de imagens, o que significa no caso deste trabalho a extração da rede de poros e ligações. Independente da técnica que se utiliza é uma boa prática avaliar se a região de interesse binarizada traz uma boa representatividade da amostra. Este estudo pode ser realizado através do levantamento do Volume elementar representativo das imagens e da função correlação das imagens.

4.3.1 Volume elementar representativo

Um volume elementar representativo (VER) é o volume que apresenta as variações microscópicas em toda forma e proporções da amostra (Bear 1972). Em outras palavras, uma imagem que não apresente características de um volume elementar representativo não é suficientemente grande para conter toda a variedade de estruturas porosas existentes e não produzirá resultados confiáveis.

Um estudo que pode ser realizado para determinação do VER está relacionada a porosidade da amostra. Para se verificar se o volume é representativo, se divide o mesmo volume em porções menores e se computa a porosidade para cada um dos sub-volumes. Em seguida aumenta-se as dimensões dos sub-volumes e computa-se também a porosidade. A expectativa é que a partir de um determinado valor a porosidade aponte uma tendência para o valor encontrado para porosidade do volume original.

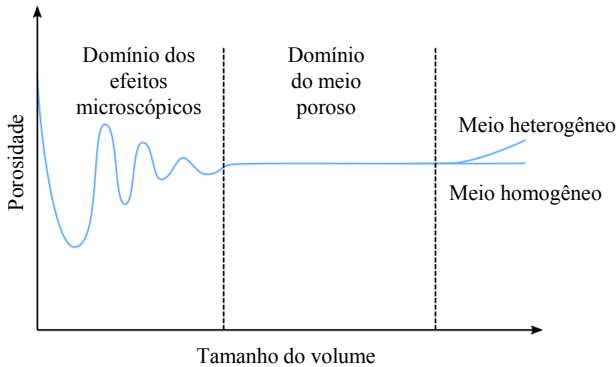


Figura 58 Definição do volume elementar representativo (Bear 1972)

São apresentados a seguir os resultados deste estudo para as cinco amostras.

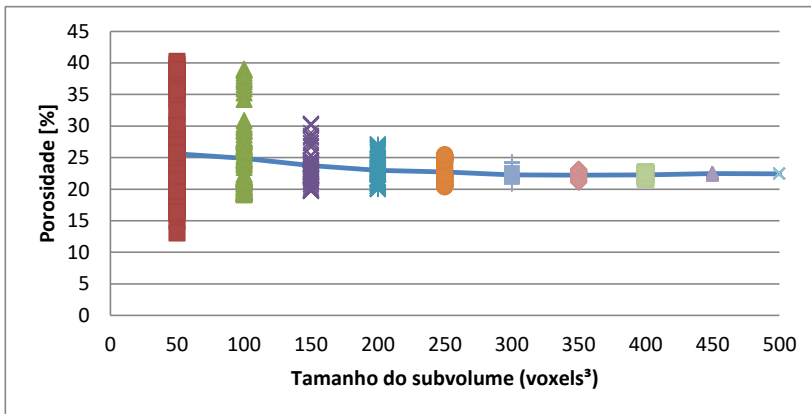


Figura 59 Distribuição de valores de porosidade para sub amostras de 50³ à 500³ voxels para a amostra BS

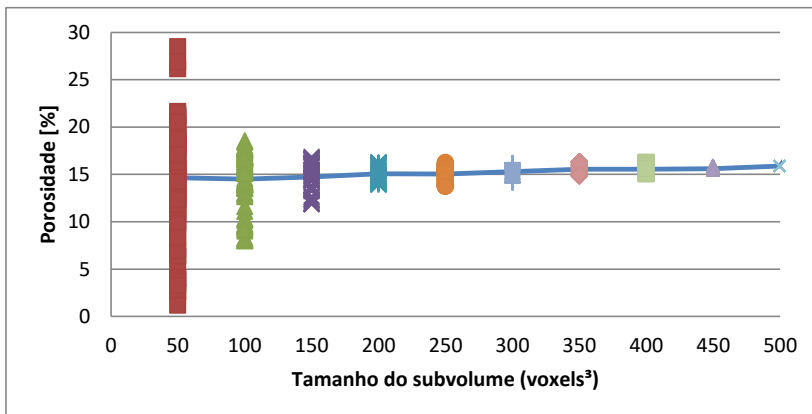


Figura 60 Distribuição de valores de porosidade para sub amostras de 50^3 à 500^3 voxels para a amostra BBS

Observa-se, por exemplo, que para amostra BS a análise de porosidade para subvolumes de 50^3 voxels apresenta variações de 6.61% à 42.62%. Conforme se aumenta o volume até o tamanho original e 500^3 voxels, observa-se que os valores tendem para os valores de porosidade de 22,45%. O mesmo acontece para as amostras BBS, GBS, IBS e IGS cujos valores de porosidade apresentam tendência para os valores 15.87%, 14.06%, 25.45% e 24.74% respectivamente.

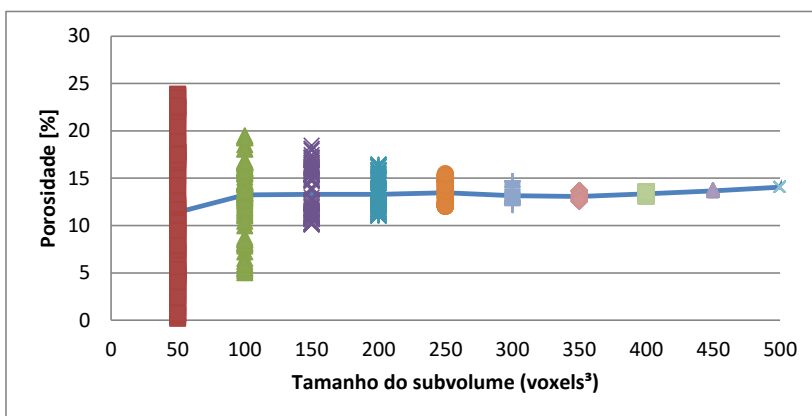


Figura 61 Distribuição de valores de porosidade para sub amostras de 50^3 à 500^3 voxels para a amostra GBS

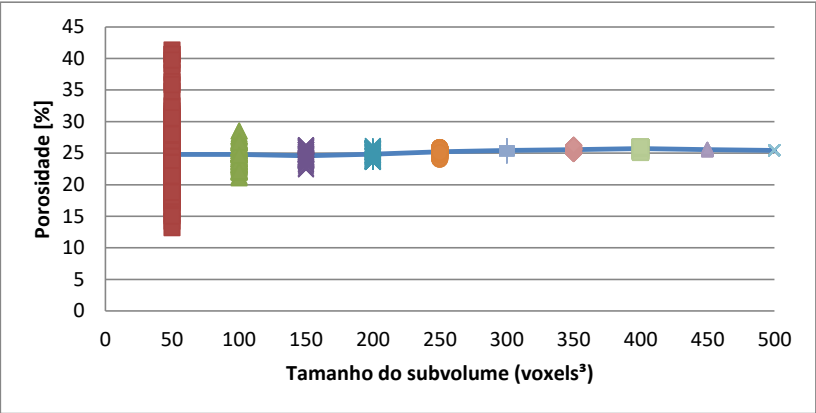


Figura 62 Distribuição de valores de porosidade para sub amostras de 50³ à 500³ voxels para a amostra IBS

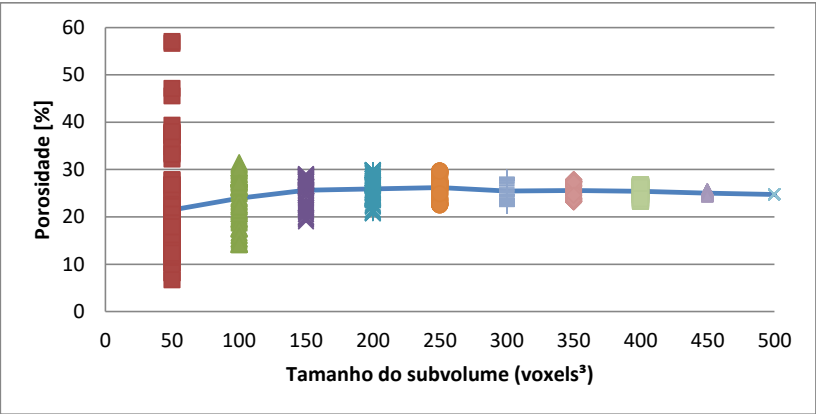


Figura 63 Distribuição de valores de porosidade para sub amostras de 50³ à 500³ voxels para a amostra IGS

4.3.2 Função correlação

Define-se uma função de fase Z_I em uma imagem binária como:

$$Z_{\mathfrak{I}}(\vec{x}) = \begin{cases} 1 & \text{se } \vec{x} \text{ pertence à fase } \mathfrak{I} \\ 0 & \text{se } \vec{x} \text{ não pertence à fase } \mathfrak{I} \end{cases}, \quad 4.1$$

onde \vec{x} representa um vetor posição em relação a uma determinada origem e \mathfrak{I} representa uma das fases da imagem (porosa ou sólida). A fração volumétrica (porosidade total) para um meio estatisticamente homogêneo é dada por:

$$\phi_{\mathfrak{I}} = \langle Z_{\mathfrak{I}}(\vec{x}) \rangle, \quad 4.2$$

de modo que o operador $\langle \rangle$ representa a média estatística no domínio da imagem. Sabe-se que $0 \leq \phi_{\mathfrak{I}} \leq 1$ e que $\phi_{\text{fase } 1} + \phi_{\text{fase } 2} = 1$.

A função correlação para cada fase é definida por:

$$C_{\mathfrak{I}}(\vec{u}) = \langle Z_{\mathfrak{I}}(\vec{x}) Z_{\mathfrak{I}}(\vec{x} + \vec{u}) \rangle. \quad 4.3$$

Para cada deslocamento \vec{u} arbitrário no plano da imagem. Considerando-se um meio isotrópico, a correlação dependerá apenas de $\vec{u} = |\vec{u}|$. Portanto pode-se escrever:

$$C_{\mathfrak{I}}(u) = \langle Z_{\mathfrak{I}}(i, j, k) Z_{\mathfrak{I}}(i + u, j, k) \rangle. \quad 4.4$$

Com isto, para um deslocamento nulo ($u = 0$), a função de correlação atinge o valor máximo em $\phi_{\mathfrak{I}}$. E para deslocamentos maiores, à medida que $u \rightarrow \infty$, os valores para função tendem para $\phi_{\mathfrak{I}}^2$.

De maneira geral, esta função apresenta a probabilidade de dois voxels separados por uma distância u pertençam a uma mesma fase. É de grande utilidade para técnicas de reconstrução de imagens tridimensionais a partir de seções bidimensionais. Além disto, pode ser utilizada para verificar a representatividade de um volume binarizado. Isto é feito analisando-se o alcance da correlação, que é justamente o

deslocamento u necessário para que a função estabilize-se em valores de ϕ_1^2 .

As figuras abaixo mostram a curva da função de correlação de acordo com o deslocamento para cada amostra. O que se observa é que as curvas atingem a estabilidade com valores de deslocamento inferior ao tamanho da região de interesse utilizada para todas as amostras. Isto serve como um indicativo que o volume utilizado para a caracterização é representativo.

4.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

A porosimetria com injeção de mercúrio (PIM) é uma técnica experimental empregada para a caracterização de amostras de meios porosos. Através dela podem se obter propriedades como a curva de pressão capilar, distribuição de tamanho de poros, porosidade efetiva e superfície específica do meio poroso. Os ensaios com mercúrio têm sido bastante empregados pelo fato deste material ser não molhante à maioria das substâncias, desta forma não penetra espontaneamente nos poros por ação capilar.

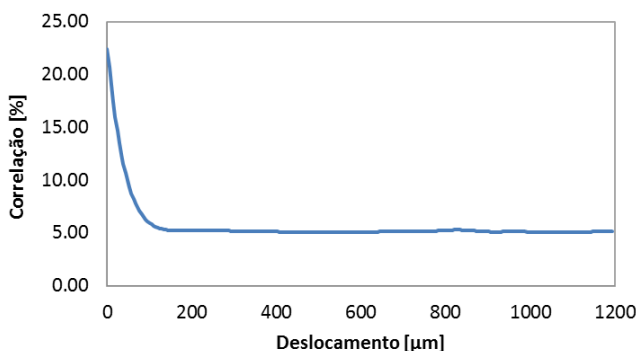


Figura 64 Função correlação para a amostra BS

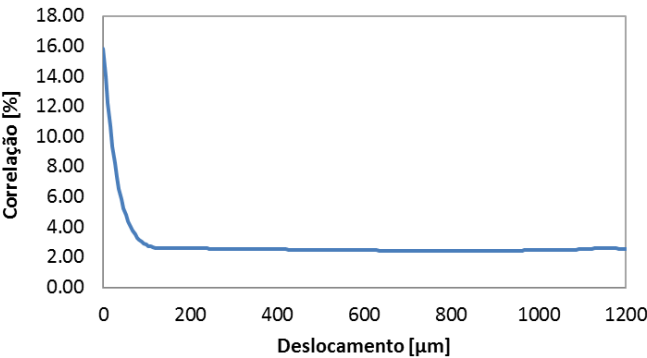


Figura 65 Função correlação para a amostra BBS

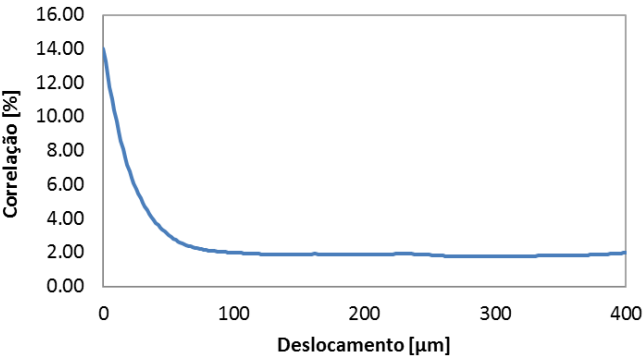


Figura 66 Função correlação para a amostra GBS

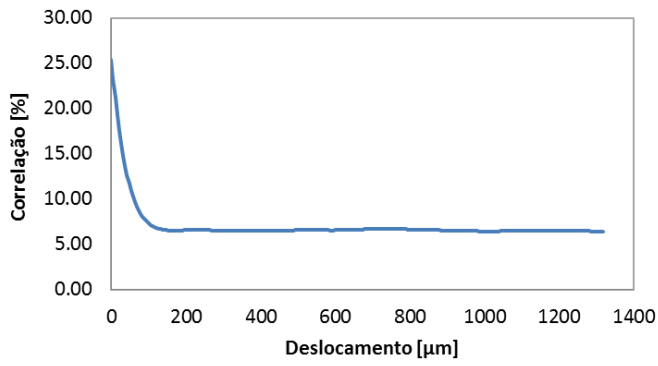


Figura 67 Função correlação para a amostra IBS

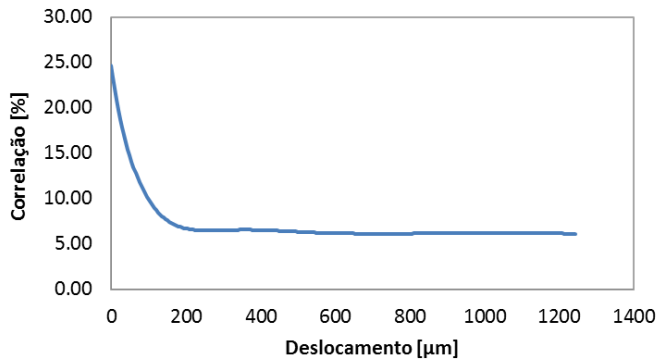


Figura 68 Função correlação para a amostra IGS

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a caracterização das amostras através de um código computacional responsável pela extração de uma rede de poros e ligações utilizando os conceitos de esferas máximas como apresentado no capítulo 2, simulação de escoamento monofásico apresentado no capítulo 3.2 e intrusão de mercúrio. Os resultados de porosidade e permeabilidade serão comparados com dados experimentais disponíveis.

5.1 Inspeção visual da rede

Para iniciar a análise da caracterização através da rede é feita uma inspeção visual com o objetivo de se observar o comportamento correto de extração da rede, de identificação e diferenciação de regiões de poros e gargantas. Na Figura 69 são apresentados à esquerda os voxels de poro da amostra em azul e a direita a rede extraída. É possível perceber o posicionamento dos poros, representados por esferas nas regiões onde há maior espaçamento entre grãos. Pode-se perceber também a localização de alguns poros isolados. A Figura 70 apresenta a rede completa gerada para imagem BS de 500^3 voxels.

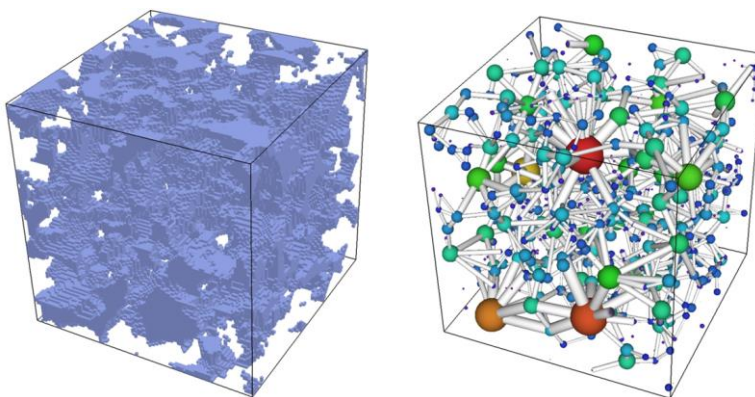


Figura 69 Inspeção da rede de uma porção menor (200^3 voxels) da imagem da amostra BS

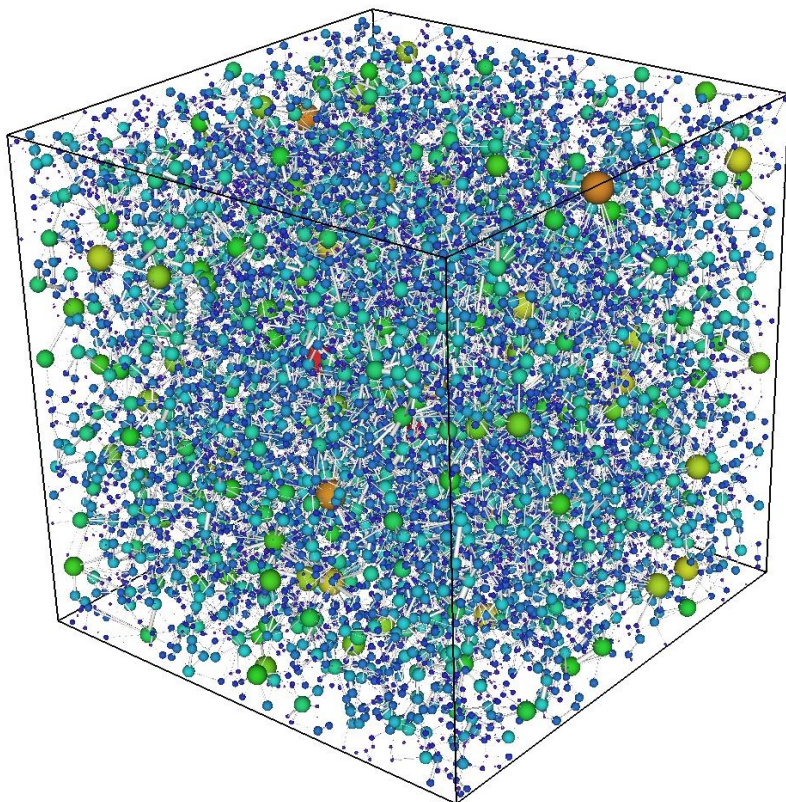


Figura 70 Visualização da rede extraída para a amostra BS, os poros são representados com cores variando do azul ao vermelho de acordo com seu tamanho

5.2 Descrição do espaço poroso

A descrição de uma amostra consiste no estudo de algumas propriedades geométricas e topológicas da rede, permitindo uma visualização de aspectos importantes como número de poros e gargantas encontrados, a distribuição do tamanho dos poros, número de coordenação. Esta análise é apresentada em sua maioria na forma de histogramas, distribuição de comprimento das gargantas, área superficial, volume de poros e gargantas etc.

5.2.1 Distribuição de tamanho de poros

A distribuição de tamanho de poros é um dos primeiros estudos a ser realizado na caracterização de um meio poroso. Esta análise possibilita uma visualização da variação do tamanho das estruturas porosas e se a amostra apresente raio característico. Esta distribuição é feita com base volumétrica. Isto quer dizer que é dado um peso a cada poro de acordo com o volume poroso total. Este dado é mais interessante, uma vez que não se está interessado apenas na quantidade de poros de determinado tamanho. E sim na parcela de volume poroso proporcionado para poros de determinado tamanho.

Para se obter uma avaliação dos resultados quanto à descrição morfológica obtida com o método de rede de poros e ligações foi realizada uma comparação com uma metodologia de análise de imagens já difundida na indústria. Esta técnica é chamada de morfologia matemática. O objetivo é encontrar a distribuição do tamanho dos poros existentes na imagem em uma fração volumétrica (o quanto de volume do espaço poroso total as estruturas de determinado tamanho ocupam). Porém, com a morfologia matemática, o espaço poroso não é segmentado em poros ou gargantas, e todo o espaço poroso é tratado da mesma forma.

A técnica consiste em realizar um “peneiramento” do espaço poroso. Este processo é realizado utilizando-se uma forma geométrica básica, como por exemplo, uma esfera discreta. Parte-se da imagem binária original, de onde se obtém o número total de voxels vazios. Segue-se então uma sequência de etapas onde se procura identificar no espaço vazio esferas discretas de determinado raio. Caso seja encontrado, estes voxels são retirados da imagem e contabilizados para os poros de tamanho igual ao raio da esfera utilizada. O tamanho de raios utilizados é em ordem decrescente, até que se chegue à esfera de raio de valor unitário que ocupe apenas um único voxel.

Na Figura 71 é apresentada a sequência de peneiramento aplicada em uma imagem bidimensional binarizada. Constata-se que o espaço poroso é constituído de 61 voxels de poro. Na primeira etapa de peneiramento é identificada uma esfera de raio de $\sqrt{5}$, composta de 13 voxels, o que contabiliza em 21,3% do espaço poroso. Na segunda etapa

são encontradas duas esferas de raio de $\sqrt{4}$ que juntas representam 29,5% do espaço poroso. Com as etapas seguintes é obtido o histograma apresentado na Figura 72.

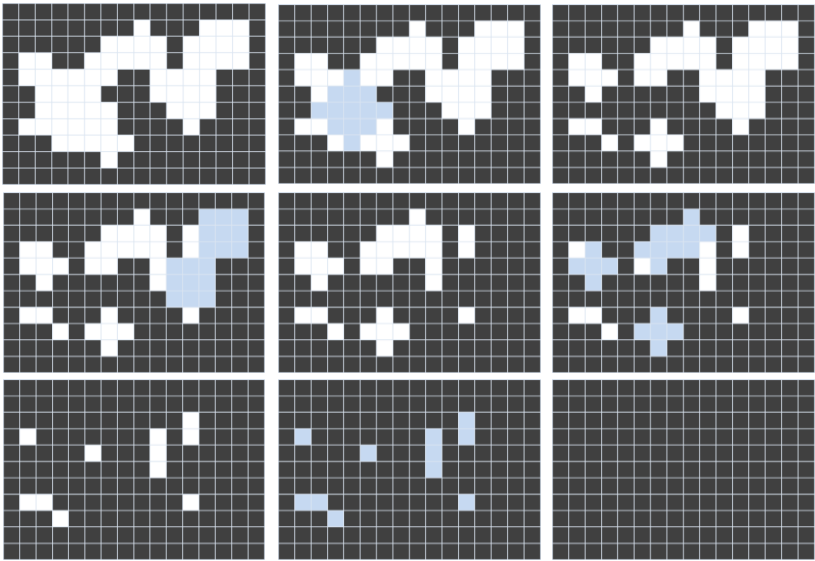


Figura 71 Sequência do peneiramento realizado com pela distribuição e tamanho de poros por morfologia matemática.

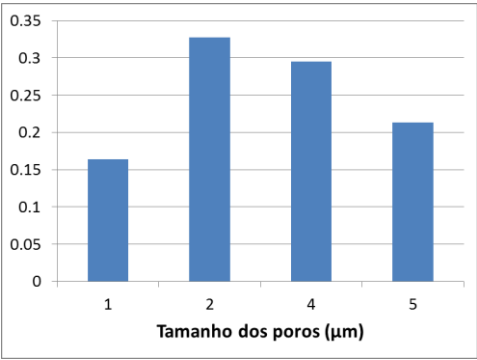


Figura 72 Distribuição de tamanho de poros do exemplo da Figura 71 utilizando a técnica de morfologia matemática.

Com o objetivo de se comparar os resultados obtidos com o método de redes de poros e ligações, deve-se levar em conta que este método segmenta o espaço poroso em duas entidades (poros e gargantas). Para que se possa realizar a comparação deve-se levar em conta estas duas estruturas na criação do histograma.

Outra consequência na segmentação do espaço poroso é que o método da rede aglomera os voxels para os poros e gargantas em elementos únicos ao contrário do que acontece na morfologia matemática. A Figura 73 apresenta os voxels do espaço poroso do exemplo da Figura 71 separados em três elementos distintos (dois poros e uma garganta). A consequência disto é que todo o volume ocupado por cada um destes elementos será associado a apenas um valor de tamanho. É, portanto, uma concepção diferente do que se entende por “tamanho de poro”.

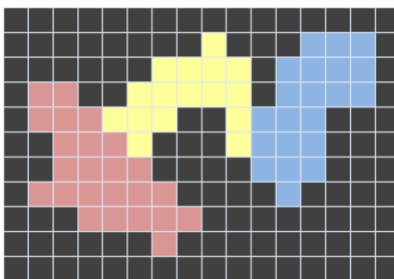


Figura 73 Espaço poroso do exemplo da Figura 71 segmentado em poros e ligações

Com isto se espera que o método de morfologia matemática apresente uma maior participação de poros menores, já que muitos deles na concepção da rede fazem parte de poros maiores. Isto se confirma nas Figuras 75 à 79 que trazem a distribuição dos tamanhos de poros para as cinco amostras.

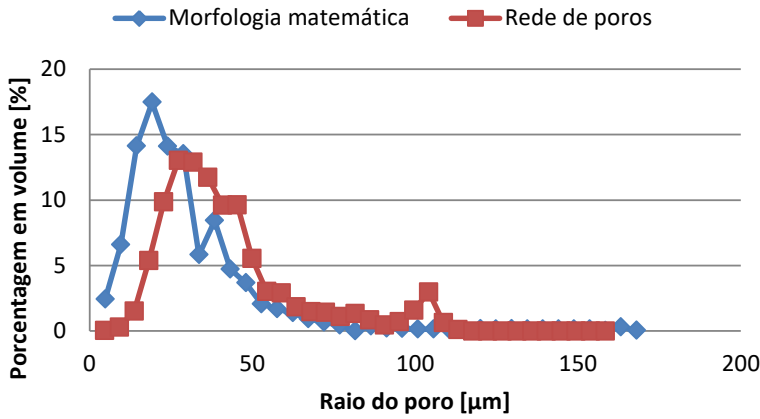


Figura 74 Distribuição do tamanho de poros utilizando morfologia matemática e rede de poros e ligações para a amostra BS

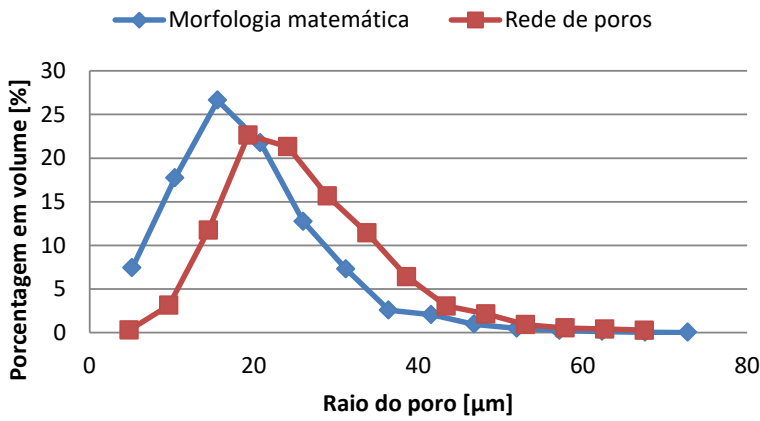


Figura 75 Distribuição do tamanho de poros utilizando morfologia matemática e rede de poros e ligações para a amostra BBS

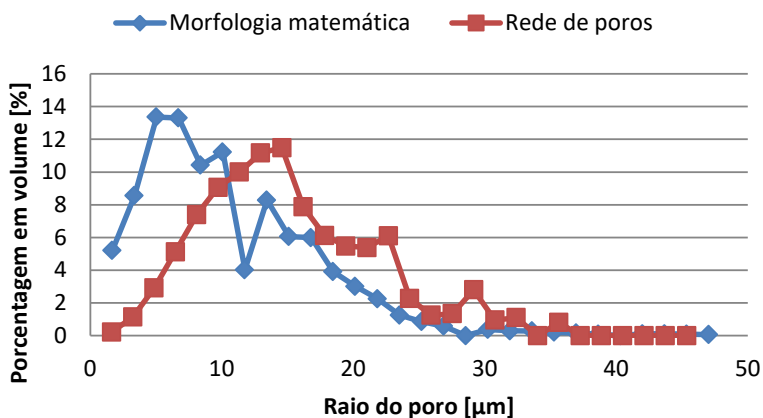


Figura 76 Distribuição do tamanho de poros utilizando morfologia matemática e rede de poros e ligações para a amostra GBS

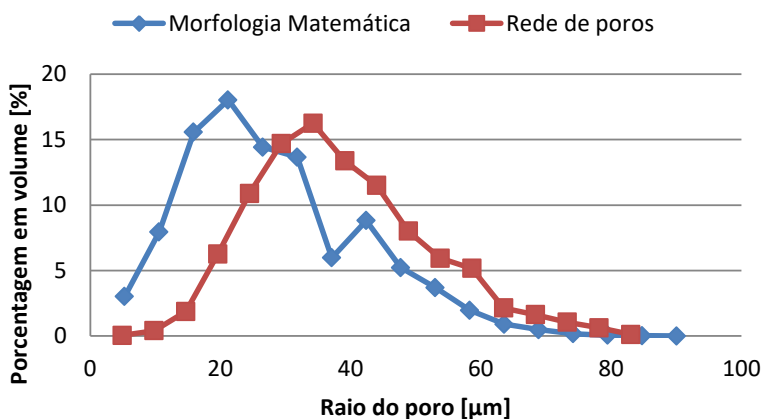


Figura 77 Distribuição do tamanho de poros utilizando morfologia matemática e rede de poros e ligações para a amostra IBS

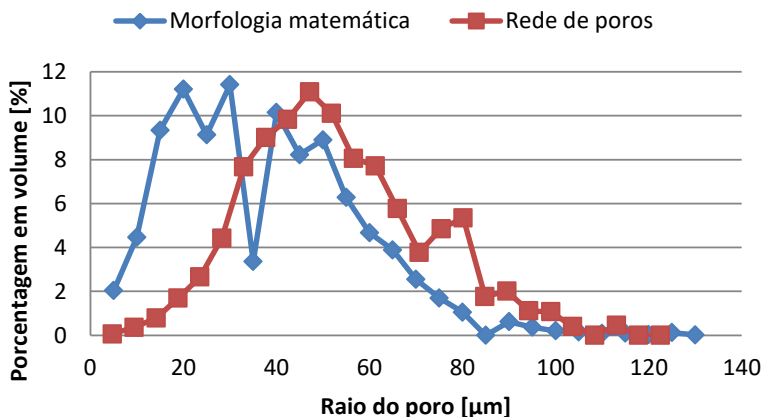


Figura 78 Distribuição do tamanho de poros utilizando morfologia matemática e rede de poros e ligações para a amostra IGS

Por conta desta diferença de abordagens, as curvas apesar de apresentar uma forma semelhante, apresentam uma defasagem. Sendo que a curva gerada pelo método de redes de poros e ligações dá um peso volumétrico maior para poros de maior tamanho.

5.2.2 Número de coordenação

Outro dado de interesse que pode ser obtido quando se utiliza a rede de poros e ligações para caracterização é a distribuição do número de coordenação. O número de coordenação corresponde à quantidade de conexões de um determinado poro com outros da rede. Esta informação é puramente topológica e proporciona um melhor entendimento da conectividade e tem grande influência nas propriedades de transporte.

5.2.3 Comparação dos resultados com dados medidos em laboratório

Os plugues dos quais foram adquiridas as tomografias foram extraídos na altura de 27 cm a partir de uma altura de referência dos testemunhos de cada rocha. Dispõe-se de dados experimentais de porosidade e permeabilidade absoluta para plugues extraídos nas alturas de 0, 7, 15, 35, 40 e 45 cm a partir da mesma altura de referência. Desta forma os dados experimentais apresentados não são referentes exatamente à mesma porção de rocha da qual se fez a análise de imagens, sendo esta uma prática comum, uma vez que o plugues caracterizados experimentalmente e por análise de imagens passam por

tratamentos diferentes. Com a quantidade de dados experimentais que se possui para cada rocha é possível observar a variação dos valores das propriedades, que existem mesmo para rochas siliciclásticas. Desta forma, pode-se identificar um intervalo de valores esperados para a caracterização por meio da rede.

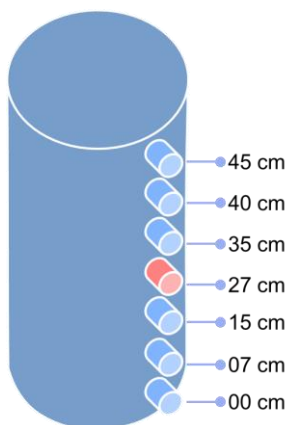


Figura 79 Representação dos plugues retirados do testemunho de onde foram realizadas medidas das propriedades em laboratório (azul) e adquiridas imagens (rosa)

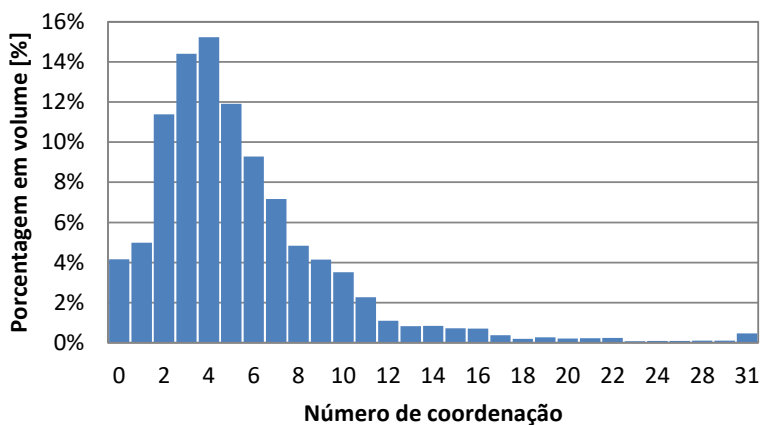


Figura 80 Distribuição de tamanho de poros em base volumétrica da amostra BS

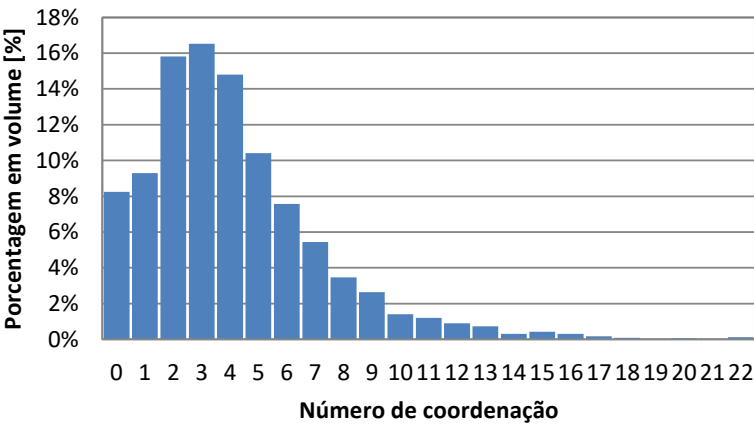


Figura 81 Distribuição de tamanho de poros em base volumétrica da amostra BBS

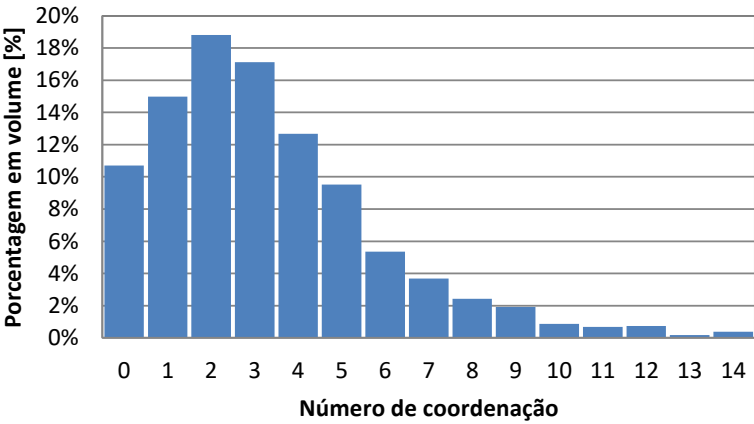


Figura 82 Distribuição de tamanho de poros em base volumétrica da amostra GBS

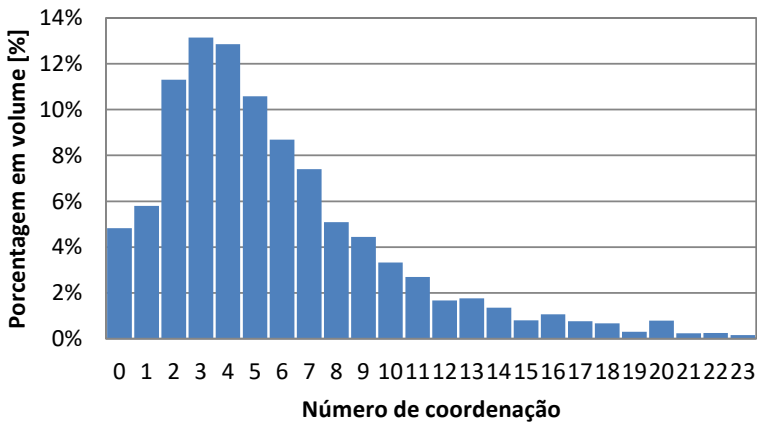


Figura 83 Distribuição de tamanho de poros em base volumétrica da amostra IBS

Nas seções seguintes são comparados os resultados obtidos com o modelo de rede de poros e ligações e aqueles obtidos de maneira experimental. Os dados medidos em laboratório são apresentados em tabelas onde as linhas representam as alturas em centímetros de onde foram extraídos os plugues medidos, e as colunas são referentes à cada tipo de rocha.

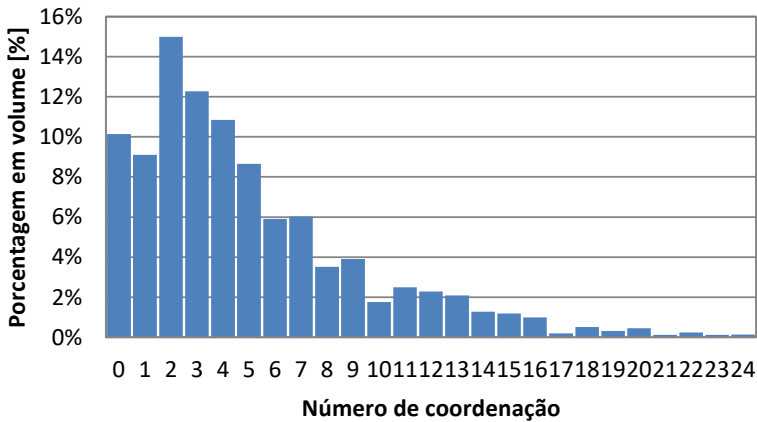


Figura 84 Distribuição de tamanho de poros em base volumétrica da amostra IGS

5.3 Porosidade total e efetiva

Pode-se observar na Tabela 4 os valores para porosidade medidos em laboratório para cada testemunho. Observa-se que esta propriedade é bastante homogênea para estas rochas, sendo que a maior variação encontrada entre os plugues foi de 2.6% para a rocha IBS.

A Tabela 5 apresenta os valores de porosidade a partir do modelo. Os valores para porosidade da rede utilizam os voxels originais da imagem binarizada. Desta forma o parâmetro mais importante para estes resultados é a escolha do valor de threshold no processo de binarização das imagens.

A porosidade obtida por meio de métodos de análise de imagens costuma apresentar valores inferiores àqueles observados em medidas experimentais. Isto ocorre pois os métodos que fazem uso das imagens estão limitados à resolução da mesma. A medição da relação entre os voxels vazios pelo volume total da imagem só pode ser medida para aquelas estruturas porosas visíveis à capacidade de aquisição do aparelho, neste caso do microtomógrafo. Estruturas porosas de tamanho inferior, que podem representar uma parcela da porosidade total, não são contabilizadas.

Tabela 4 Porosidade das amostras medidas experimentalmente

Localização no testemunho	BS	BBS	GBS	IBS	IGS
45	23.1 %	20.9 %	19.8 %	30.2 %	29.2 %
40	23.1 %	20.9 %	19.3 %	28.8 %	28.1 %
35	23.0 %	21.0 %	19.5 %	30.1 %	28.6 %
15	23.3 %	22.2 %	19.3 %	29.0 %	30.4 %
07	23.4 %	22.5 %	19.2 %	29.0 %	30.2 %
00	23.2 %	21.5 %	18.6 %	27.6 %	29.5 %

Tabela 5 Porosidade total e efetiva das amostras através da análise de imagens

	BS	BBS	GBS	IBS	IGS
Total	22.45%	15.87%	14.06%	25.45%	24.74%
Efetiva (x)	22.42%	15.69%	13.61%	25.40%	24.60%
Efetiva (y)	22.42%	15.69%	13.61%	25.40%	24.60%
Efetiva (z)	22.42%	15.69%	13.61%	25.40%	24.60%

A porosidade efetiva utiliza a conectividade da rede para apresentar apenas a parcela porosa capaz de deslocar fluido em seu interior. Para as rochas analisadas observa-se que são muito bem interconectadas, sendo que a maior parcela de poros não interconectados foi encontrada na rocha GBS correspondendo à 0.45% da porosidade total. Observa-se também que os valores de porosidade efetiva para as três direções cartesianas são os mesmo para todas as rochas. Isto significa que todas as estruturas porosas desconexas são poros isolados , identificados igualmente para todas as direções cartesianas.

5.4 Permeabilidade absoluta

A Tabela 6 apresenta os valores experimentais de permeabilidade absoluta para cada testemunho. Foi utilizado um permeametro de gás para realizar os ensaios, portanto são apresentados também os valores com correção de Klinkenberg. Pode-se observar que mesmo para rochas homogêneas como os arenitos, existem diferenças para os valores de permeabilidade de acordo com a altura do testemunho de onde foram retirados os plugues. Algumas das rochas apresentam valores bastante próximos como a GBS (onde a faixa de valores vai de 112 à 131 mD), já a IGS por exemplo apresenta valores de 4320 à 10200 mD. Isto nos mostra que devido à grande quantidade de incertezas envolvidas, muitas vezes predizer a ordem de grandeza desta propriedade já é de grande interesse para a caracterização.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos através do modelo (simulação de escoamento através da rede) para as três direções cartesianas, conforme apresentado no capítulo 3.2.

Tabela 6 Permeabilidade absoluta das amostras medidas em laboratório com a correção de Klinkenberg de acordo com sua posição no testemunho

Localização no testemunho	BS		BBS		GBS		IBS		IGS	
	K _{air}	K _{klink}	K _{air}	K _{klink}	K _{air}	K _{klink}	K _{air}	K _{klink}	K _{air}	K _{klink}
45	2620	2530	359	333	145	131	3980	3860	6490	6330
40	2670	2580	320	296	136	123	3670	3550	5620	5480
35	2690	2600	345	320	125	111	4590	4460	4450	4320
15	3190	3080	476	445	127	114	3770	3660	7580	7410
07	3130	3030	443	413	129	115	5210	5070	10400	10200
00	2620	2530	384	357	125	112	3020	2920	6490	6330

Tabela 7 Permeabilidade absoluta das amostras para cada direção cartesiana e seu valor médio

	BS	BBS	GBS	IBS	IGS
K _X	2748	478	119	3772	9217
K _Y	2778	474	101	4305	6438
K _Z	3186	451	122	4417	5756
K _{avg}	2904	468	114	4165	7137

Percebe-se que dispomos de amostras com diferentes faixas de permeabilidade e o modelo foi capaz de responder com resultados coerentes para todos os intervalos de valores de cada tipo de rocha. Lembrando que o plugue do qual se obteve a imagem se encontra na altura de 27 cm do ponto de referência, desta forma a Tabela 6 destaca os valores experimentais para os plugues das regiões mais próximas. É válido também lembrar da diferença de tamanho entre o plugue analisado experimentalmente e a pequena porção da rocha da qual foi extraída a rede. Conta-se com o comportamento homogêneo do tipo de rocha sendo aqui analisado para se apresentar resultados utilizando somente uma escala.

A Figura 85 apresenta em forma de gráfico os valores para permeabilidade experimental (com correção de Klinkenberg) medida

nos plugues nas alturas de 15 e 35 cm e o valor médio encontrado para a permeabilidade estimada com a rede de poros e ligações da amostra retirada na altura de 27 cm.

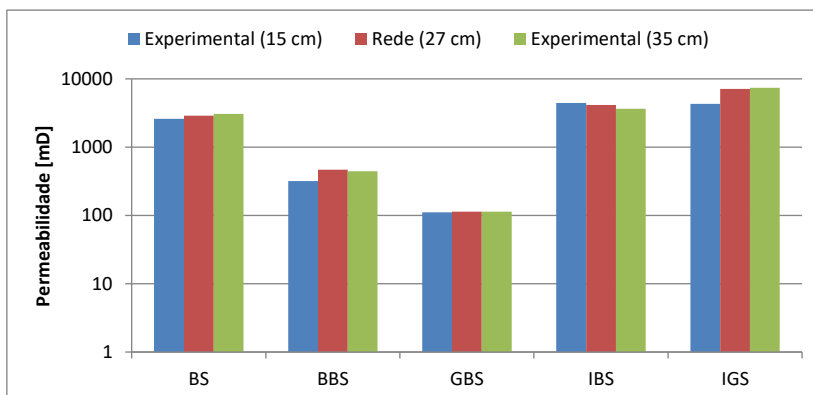


Figura 85 Permeabilidade média calculada através das redes e as medida em laboratório (plugues mais próximos da região e onde foi adquirida a imagem)

O valor médio de permeabilidade apresentado na Tabela 7 é referente às respostas encontradas pelo modelo nas três direções cartesianas. Este dado traz um significado de cunho estatístico, podendo ser utilizado para interpretação em amostras com comportamento isotrópico desta propriedade. Em rochas anisotrópicas, como a maioria dos carbonatos, os valores de permeabilidade devem ser interpretados para cada direção cartesiana, uma vez que podem apresentar direções com grande transmissibilidade e outras de características selantes. Mesmo em rochas siliciclásticas, pode-se encontrar anisotropia como é observado, por exemplo, na rocha IGS, na qual o modelo apresenta uma variação de 5756 mD na direção z e 9217 mD na direção x.

5.5 Curvas de pressão capilar

A seguir são apresentadas as curvas de pressão capilar por intrusão de mercúrio. São comparados os resultados obtidos com a rede de poros e ligações, o método apresentado por Magnani (1997) e dados medidos em laboratório.

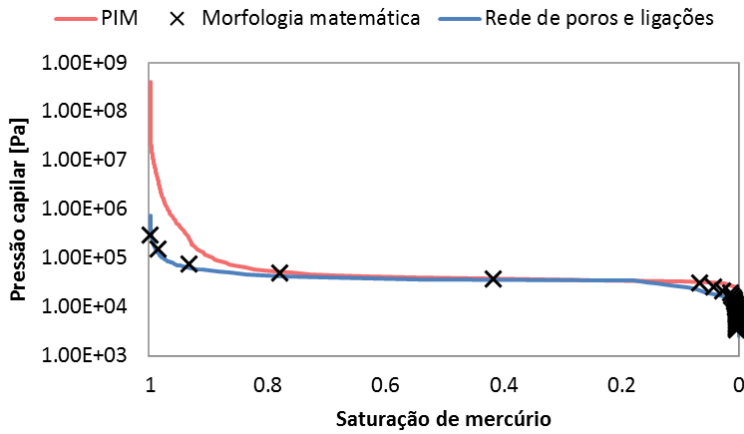


Figura 86 Curvas de pressão capilar para intrusão de mercúrio com dados experimentais e por métodos de análise de imagens para a amostra BS

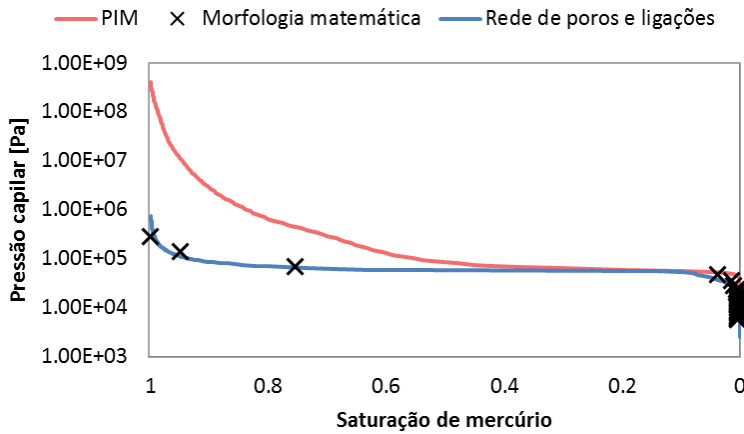


Figura 87 Curvas de pressão capilar para intrusão de mercúrio com dados experimentais e por métodos de análise de imagens para a amostra BBS

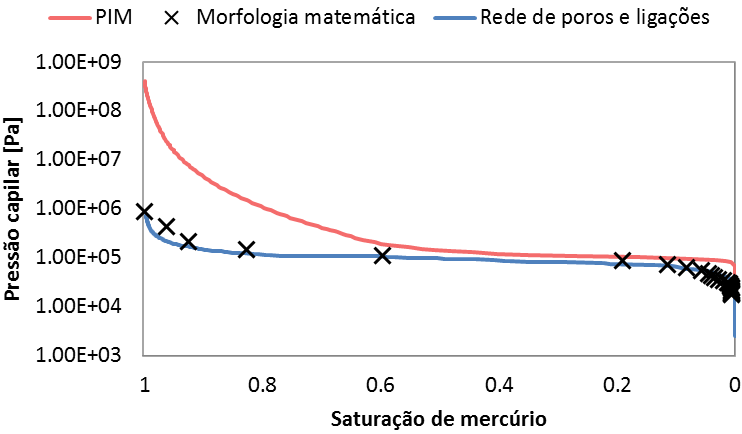


Figura 88 Curvas de pressão capilar para intrusão de mercúrio com dados experimentais e por métodos de análise de imagens para a amostra GBS

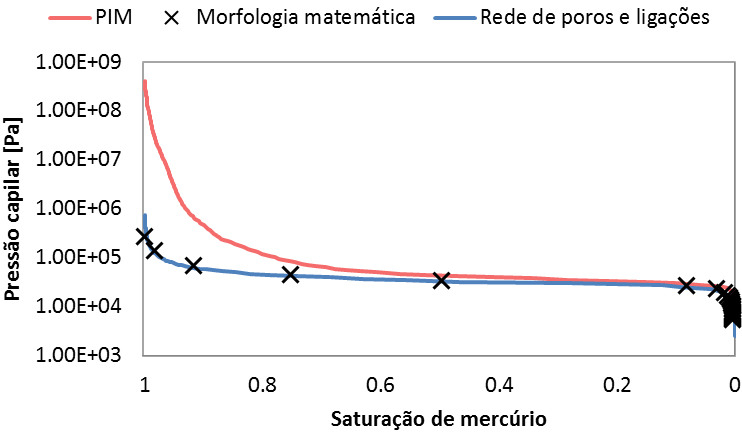


Figura 89 Curvas de pressão capilar para intrusão de mercúrio com dados experimentais e por métodos de análise de imagens para a amostra IBS

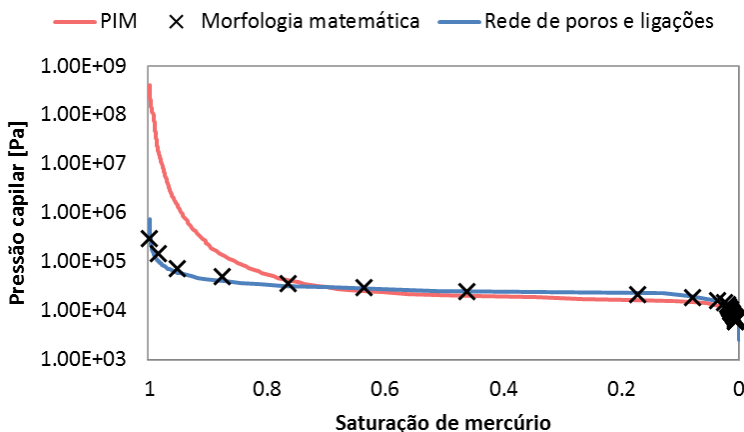


Figura 90 Curvas de pressão capilar para intrusão de mercúrio com dados experimentais e por métodos de análise de imagens para a amostra IGS

Observa-se que os métodos baseados em análise de imagens (morfologia matemática e rede de poros e ligações) apresentam resultados bastante similares, enquanto a curva produzida pelos dados medidos experimentalmente normalmente apresenta valores de pressão mais elevados para se obter as mesmas saturações que nos modelos, principalmente na parcela final da curva. Isto se deve ao fato dos métodos baseados na imagem estarem limitados à resolução da imagem.

Isto torna os poros menores, que exigiriam uma maior pressão capilar para a intrusão do mercúrio, “invisíveis” aos modelos matemáticos.

Apesar disto, tanto a rede de poros e ligações quanto a morfologia matemática foram bem sucedidos em capturar a *break through pressure*: O valor para a pressão capilar que provoca um rápido avanço da intrusão de mercúrio na amostra, caracterizado pela parte central da curva de pressão capilar (grande variação de saturação do mercúrio com mínima variação da pressão capilar).

Realizadas as caracterizações de todas as amostras, é possível comparar os resultados e analisar a relação entre as propriedades petrofísicas obtidas, dispostas de forma resumida na .

Tabela 8 Resumo dos resultados obtidos com o método de redes de poros e ligações

Amostra	Permeabilidade absoluta média (mD)	Porosidade total	Tamanho médio do poro (μm)	Número médio de coordenação	Raio de <i>break through</i> (μm)
BS	3090.55	22.45%	42.8	1.34	19.56
BBS	496.18	15.87%	26.0	2.35	14.67
GBS	120.38	14.06%	15.20	2.31	11.76
IBS	4165.13	25.45%	38.34	2.81	31.80
IGS	7136.82	24.74%	52.93	2.54	40.00

Nesta tabela, a permeabilidade está apresentada como uma média dos valores encontrados para as três direções cartesianas e a pressão de *break through* é apresentada na forma de uma dimensão, o raio de *break through*. Este dado é um pós-processamento obtido ao empregarmos os valores de pressão *de break through* na equação 3.23. Este dado é de grande valor, pois além de trazer uma informação de tamanho dos poros da rede, (assim como o raio médio dos poros retirado da distribuição do tamanho das estruturas porosas), está também presente uma informação de conectividade entre poros, tornando-o mais interessante, portanto. O que se observa é que este dado atua de forma imperativa nos valores de permeabilidade das amostras.

Por exemplo: As amostras BBS e GBS apresentam porosidades totais semelhantes, mas apresentam diferenças significativas de valores de permeabilidade absoluta. Observa-se que a porosidade, o número de coordenação médio e o raio de *break through* da amostra GBS são maiores, o que explicaria o fato de esta rocha ser mais permeável. Porém, para o caso das amostras IBS e IGS, também se observam valores equivalentes de porosidade. Neste caso a porosidade e número de coordenação médio da rocha IBS são levemente maiores, o que a princípio poderia significar uma maior permeabilidade, porém isto não se observa na realidade (a rocha IGS é mais permeável). No entanto observamos que para este caso o raio de *break through* da rocha IGS é significativamente maior (acompanhado também do raio médio dos

poros), mostrando a sua grande influência nos resultados de permeabilidade.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a problemática existente na caracterização de rochas reservatório por meio de análise de imagens. Para tanto, utilizou o método da extração de redes de poros e ligações a partir de imagens tridimensionais adquiridas por meio da tomografia computadorizada.

No capítulo 5 foi apresentada a caracterização de cinco amostras de rochas, realizada por meio do código computacional desenvolvido como fruto deste trabalho. Desta forma foi possível obter uma descrição morfológica da rocha e propriedades petrofísicas como porosidade total e efetiva, permeabilidade absoluta e curva de pressão capilar por intrusão de mercúrio.

Os resultados para porosidade foram comparados com dados experimentais de amostras do mesmo testemunho. Foram comparados os métodos de morfologia matemática e da rede de poros e ligações para se estabelecer uma distribuição de tamanho de poros. Também se dispunha de dados experimentais para permeabilidade absoluta, que foram confrontados com as predições fornecidas pelo modelo apresentando bons resultados para todas as amostras. O modelo mostrou-se capaz de caracterizar rochas de diferentes características de transmissividade (foram analisadas amostras com permeabilidade da ordem de 100mD e da ordem de 7000 mD). A curva de pressão capilar foi comparada com métodos de morfologia matemática e dados experimentais, conseguindo representar a intrusão de mercúrio na amostra e boa parte da curva experimental, foram interpretadas as diferenças entre os resultados obtidos.

O método de extração de redes e poros e ligações desenvolvido neste trabalho se mostrou capaz de auxiliar o processo de caracterização de rochas reservatório, apresentando baixo tempo de processamento computacional para a realização das estimativas de propriedades petrofísicas e boa concordância com os resultados experimentais.

6.1 Objetivos futuros

6.1.1 Escoamento multi-fásico

Para que se possam realizar estimativas de permeabilidade relativa, saturação irreduzível de água e outras propriedades petrofísicas

como estas, é necessário que o modelo matemático de escoamento através da rede contemple a presença de dois ou mais fluidos imiscíveis no seu interior. A rede gerada neste trabalho já estaria preparada para isto, uma vez que utiliza elementos prismáticos para representar as estruturas porosas originais. Pode-se modelar a retenção de fluidos nos cantos dos elementos por ação de força capilar: Isto representaria o filme de fluido preferencialmente molhante (por exemplo água) presente nos poros mesmo quando este é invadido por fluido não molhante (óleo).



Figura 91 Elemento prismático da rede contendo dois fluidos imiscíveis em seu interior num processo de drenagem

Estão muito interligadas as propriedades de permeabilidade efetiva e forças capilares, desta forma é usual que se calculem em conjunto as curvas de pressão capilar e de permeabilidades relativas em situações de drenagem primária e embebição (seguidos ou não de drenagens e embebições subsequentes). Assim, para uma determinada condição de pressão capilar se calcula a saturação dos fluidos presentes. Para isto se calcula a condição de invasão de fluido não-molhante nas estruturas. Para se levar em conta uma geometria prismática generalizada, pode-se utilizar a expressão apresentada por (Øren et al. 1998) para avaliar a condição de intrusão.

$$P_c = \frac{\sigma \cos \theta (1 + 2\sqrt{\pi})}{r} F_d(\theta, G, \beta) \quad 6.1$$

Sendo σ e θ correspondentes à tensão interfacial e ao ângulo de contato respectivamente. E F_d representa um fator adimensional de correção para o fluido molhante retido nos cantos dos elementos. Para uma determinada saturação são conhecidas as configurações dos fluidos no interior dos seus elementos, e através da conectividade da rede e avaliadas as continuidades das fases ao longo das estruturas porosas pode-se avaliar a vazão de um poro a outro. Desta forma, constrói-se também um conjunto de equações lineares. As condutâncias hidráulicas

devem ser calculadas de forma diferente para as fases que estejam contidas nos cantos, ou regiões centrais dos elementos.

6.2 Redes multi-escalas

Uma vez que as amostras caracterizadas neste trabalho apresentavam estruturas porosas de escalas espaciais muito próximas, foi possível representá-las com a aquisição de uma única imagem associada a um único valor de resolução. Porém, para estruturas de maior complexidade, como geralmente são os carbonatos e até mesmo alguns arenitos, que apresentem poros de tamanhos muito diferentes, a utilização de uma única resolução pode se mostrar incapaz de representar bem uma destas amostras. Em rochas como estas, poros de tamanhos maiores aparentemente desconectados estão interconectados por caminhos porosos que não puderam ser captados pela resolução utilizada.

A fim de contemplar todas as escalas geométricas destas rochas porosas uma alternativa é realizar a geração de rede multiescalares a partir de imagens com diferentes resoluções espaciais (Kronbauer 2014; Mantovani 2013). O procedimento para geração de redes como estas faz uso de redes estocásticas geradas a partir de redes extraídas normalmente, de acordo com as técnicas apresentadas neste trabalho.

6.2.1 Redes estocásticas

A partir de uma determinada rede de poros e ligações é possível extrair diversas informações estatísticas (número de poros, gargantas, poros desconectados, poros de fronteira, distribuição de tamanho de poros, fatores de forma, etc). Jiang (2011) define um procedimento para geração de uma rede estocástica de tamanho arbitrário:

1. Determinar um volume de domínio
2. Criar um número apropriado de poros com base no domínio, utilizando para estes valores de raio, volume, fator de forma, e número de coordenação e acordo com as estatísticas
3. Posicionar os poros no domínio evitando a sobreposição dos mesmos

4. Criar um número apropriado de gargantas, com valores de raio, volume e fator de forma de acordo com a estatística
5. Posicionar as gargantas entre pares de poros, de acordo com as informações de comprimento e número de coordenação.

6.2.2 Procedimento para construção da rede multiescalar

São utilizadas duas redes de poros e ligações com resoluções espaciais diferentes: A rede extraída a partir dos poros maiores é chamada de escala grossa enquanto a rede contendo os poros menores é chamada de escala fina. Esta metodologia pode ser estendida para mais escalas, mas as integrações de escalas devem sempre ser feitas duas a duas.

Wu (2011) define os dois passos principais para a geração de uma rede multiescalar:

1. Extração das redes de poro e ligação para a escala grossa e fina
2. Opcionalmente pode se gerar uma rede estocástica da escala grossa caso não se deseje utilizar todo o volume desta escala
3. É gerada uma rede estocástica da escala fina que ocupe os espaços não ocupados por poros da escala grossa (pode-se utilizar ou a rede original ou a rede estocástica da escala grossa)
4. Integração das redes com poros e gargantas para combinar as informações

O primeiro passo é realizado de acordo com o que é apresentado na seção 6.2.1. No segundo passo, é realizada a combinação entre as redes. Aqui surgem dois principais desafios: O primeiro deles é quanto à capacidade computacional. Caso seja utilizado como domínio o volume original da escala grossa, a rede estocástica da escala fina para ocupar este mesmo espaço produzirá uma quantidade bastante elevada de poros e gargantas. Algumas alternativas seriam a utilização de volumes menores para a geração das redes estocásticas, ou limitar o número de poros das redes geradas.

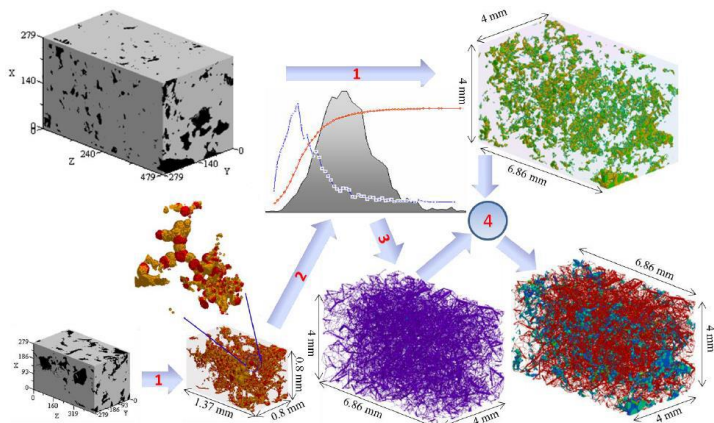


Figura 92 Representação da geração de rede multiescalar (Kronbauer 2014)

A outra dificuldade diz respeito à locação das gargantas que unirão os poros da escala grossa aos poros da rede da escala fina. Para que isto seja realizado são utilizadas análises quanto à distribuição dos número de coordenação dos poros. A Figura 92 apresenta uma representação das etapas para a geração da rede multiescalar final.

REFERÊNCIAS

- ADLER, Pierre M.; JACQUIN, Christian G.; THOVERT, Jean-François. The formation factor of reconstructed porous media. **Water Resources Research**, v. 28, n. 6, p. 1571-1576, 1992.
- AHR, Wayne M. **Geology of carbonate reservoirs: the identification, description and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks**. John Wiley & Sons, 2011.
- AL-KHARUSI, Anwar Sulaiman Zaher. **Pore-scale characterization of carbonate rocks**. 2007. Tese de Doutorado. Department of Earth Science and Engineering, Imperial College London.
- BALDWIN, Christopher A. et al. Determination and characterization of the structure of a pore space from 3D volume images. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 181, n. 1, p. 79-92, 1996.
- BEAR, J. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York: American Elsevier Publishing Company. 1972.
- BENZI, Roberto; SUCCI, Sauro; VERGASSOLA, Massimo. The lattice Boltzmann equation: theory and applications. **Physics Reports**, v. 222, n. 3, p. 145-197, 1992..
- BRYANT, Steven; BLUNT, Martin. Prediction of relative permeability in simple porous media. **Physical Review A**, v. 46, n. 4, p. 2004, 1992.
- BRYANT, Steven L.; KING, Peter R.; MELLOR, David W. Network model evaluation of permeability and spatial correlation in a real random sphere packing. **Transport in Porous Media**, v. 11, n. 1, p. 53-70, 1993.
- BRYANT, Steven L.; MLLOR, David W.; CADE, Christopher A. Physically representative network models of transport in porous media. **AIChE Journal**, v. 39, n. 3, p. 387-396, 1993.
- BRYANT, Steven; RAIKES, Sue. Prediction of elastic-wave velocities in sandstones using structural models. **Geophysics**, v. 60, n. 2, p. 437-446, 1995.
- CHEN, Shiyi; DOOLEN, Gary D. Lattice Boltzmann method for fluid flows. **Annual review of fluid mechanics**, v. 30, n. 1, p. 329-364, 1998.

CHICOUREL, V. Diversos métodos de determinação da porosidade em laboratório: Estudo Comparativo. **Bol. Tec. PETROBRAS**, v. 3, p. 107-119, 1959.

COEURJOLLY, David; MONTANVERT, Annick. Optimal separable algorithms to compute the reverse euclidean distance transformation and discrete medial axis in arbitrary dimension. **arXiv preprint arXiv:0705.3343**, 2007.

CUNHA, A. R. et al. Determination of petrophysical properties of rocks via simulation: an interdisciplinary way. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 4, p. 1-8, 2012.

CUNHA, Andre Rafael et al. Caracterização de sistemas porosos de rochas reservatório de petróleo a partir da extração de redes poro-ligações. 2012.

DELERUE, Jean-François; PERRIER, Edith. DXSoil, a library for 3D image analysis in soil science. **Computers & Geosciences**, v. 28, n. 9, p. 1041-1050, 2002.

DONG, Hu. **Micro-CT imaging and pore network extraction**. 2008. Tese de Doutorado. Department of Earth Science and Engineering, Imperial College London.

EDWARD, R. D.; ROBERTO, A. L. Hands-on morphological image processing. In: **Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers**. 2003. p. 1-88.

FERNANDES, Celso Peres. Engenharia de microestruturas: análise quantitativa de imagens e simulação de processos físicos. **Monografia para o Concurso de Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, Florianópolis**, 2002.

GONZALES-BARRON, Ursula; BUTLER, Francis. A comparison of seven thresholding techniques with the k-means clustering algorithm for measurement of bread-crumbs features by digital image analysis. **Journal of food engineering**, v. 74, n. 2, p. 268-278, 2006.

IOANNIDIS, M. A.; CHATZIS, I. On the geometry and topology of 3D stochastic porous media. **Journal of colloid and interface science**, v. 229, n. 2, p. 323-334, 2000.

JIANG, Z. et al. Stochastic pore network generation from 3D rock images. **Transport in porous media**, v. 94, n. 2, p. 571-593, 2012.

KRONBAUER, Denise Prado. **Determinação de propriedades petrofísicas de rochas reservatórios usando modelos de redes de poros**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina.

LIANG, Z. R. et al. Prediction of Permeability from the Skeleton of 3-D Pore Structure. In: **Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference**. Society of Petroleum Engineers, 1997.

LINDQUIST, W. Brent et al. Medial axis analysis of void structure in three-dimensional tomographic images of porous media. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 101, n. B4, p. 8297-8310, 1996.

MAGNANI, F. S. et al. Extraction of 3D Pore Network and Prediction of Permeability for Reservoir Rocks. **XIV Brazilian Congress of Mechanical Engineering**, 1997.

MANTOVANI, I. **Microtomografia e Nanotomografia de Raios X aplicada à caracterização multiescalar de sistemas porosos carbonáticos**. 2013 Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

MASON, Geoffrey; MORROW, Norman R. Capillary behavior of a perfectly wetting liquid in irregular triangular tubes. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 141, n. 1, p. 262-274, 1991.

MOREIRA, Anderson Camargo. **Análise da influência da morfologia porosa de implantes de titânio no processo de crescimento ósseo**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina.

NUTTING, Perley Gilman. Physical analysis of oil sands. **AAPG Bulletin**, v. 14, n. 10, p. 1337-1349, 1930.

OKABE, Hiroshi; BLUNT, Martin J. Prediction of permeability for porous media reconstructed using multiple-point statistics. **Physical Review E**, v. 70, n. 6, p. 066135, 2004.

OKABE, Hiroshi; BLUNT, Martin J. Pore space reconstruction using multiple-point statistics. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 46, n. 1, p. 121-137, 2005.

OREN, P.-E. et al. Extending predictive capabilities to network models. **SPE journal**, v. 3, n. 04, p. 324-336, 1998.

ØREN, Pål-Eric; BAKKE, Stig. Process based reconstruction of sandstones and prediction of transport properties. **Transport in Porous Media**, v. 46, n. 2-3, p. 311-343, 2002.

ØREN, Pål-Eric; BAKKE, Stig. Reconstruction of Berea sandstone and pore-scale modelling of wettability effects. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 39, n. 3, p. 177-199, 2003.

QUIBLIER, Jacques A. A new three-dimensional modeling technique for studying porous media. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 98, n. 1, p. 84-102, 1984.

ROBERTS, Anthony P. Statistical reconstruction of three-dimensional porous media from two-dimensional images. **Physical Review E**, v. 56, n. 3, p. 3203, 1997.

ROSA, A. J.; CARVALHO, RDS. JAD XAVIER Engenharia de reservatório de petróleo. Rio de Janeiro. **Interciência: PETROBRAS**, 2006.

ROTHMAN, Daniel H.; ZALESKI, Stéphane. Lattice-gas models of phase separation: interfaces, phase transitions, and multiphase flow. **Reviews of Modern Physics**, v. 66, n. 4, p. 1417, 1994.

SAITO, Toyofumi; TORIWAKI, Jun-Ichiro. New algorithms for Euclidean distance transformation of an n-dimensional digitized picture with applications. **Pattern recognition**, v. 27, n. 11, p. 1551-1565, 1994.

SEZGIN, Mehmet et al. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. **Journal of Electronic imaging**, v. 13, n. 1, p. 146-168, 2004.

SHEPPARD, A. P.; SOK, R. M.; AVERDUNK, H. Improved pore network extraction methods. In: **International Symposium of the Society of Core Analysts**. 2005. p. 21-25.

SHIN, H. et al. Analysis of the vesicular structure of basalts. **Computers & geosciences**, v. 31, n. 4, p. 473-487, 2005.

SILIN, Dmitriy; PATZEK, Tad. Pore space morphology analysis using maximal inscribed spheres. **Physica A: Statistical mechanics and its applications**, v. 371, n. 2, p. 336-360, 2006.

SILVA, A. F. B. **Caracterização do espaço poroso em rochas por esferas máximas exatas**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina

VALVATNE, Per Henrik. **Predictive pore-scale modelling of multiphase flow**. 2004. Tese de Doutorado. Imperial College London.

WU, K. et al. Multiscale pore system reconstruction and integration. In: **International Symposium of the Society of Core Analysts, Austin, TX, Sept.** 2011. p. 18-21.

APÊNDICE: MORFOLOGIA MATEMÁTICA

(Extraído de (Mantovani 2013:70))

Morfologia é o estudo da forma. Em processamento de imagens, morfologia matemática é o nome que se dá a um conjunto de métodos, inicialmente desenvolvidos por Georges Matheron e Jean Serra em 1964, que têm em comum o objetivo de descrever os diversos objetos de uma imagem, como os poros e os grãos, por exemplo (Dougherty, Lotufo, e for Optical Engineering SPIE 2003). A morfologia reúne ferramentas muito úteis quando se trabalha com imagens binárias e, em algumas situações podem significar o sucesso ou não de um procedimento. Isto porque a maioria dos algoritmos de segmentação e de reconhecimento de padrões não é tolerante a ruídos e a pequenos defeitos, e as operações morfológicas podem preparar uma imagem para ser submetida a estes algoritmos.

Inicialmente a teoria foi desenvolvida apenas para imagens binárias. Só algum tempo depois estudos foram estendendo suas capacidades para imagens em tons de cinza. A ideia central consiste em comparar os objetos que compõem uma imagem com padrões conhecidos. Estes padrões de referência, denominados elementos estruturantes, possuem forma e tamanho pré-definidos.

Os elementos estruturantes podem ser definidos em diferentes métricas e raios no espaço discreto. As métricas descrevem a conexão entre um pixel aleatório, de interesse, e sua vizinhança. Através das métricas, definem-se as máscaras de chanfro, uteis nos cálculos de distância. Na Figura 93 observam-se as máscaras de base para as métricas d_4 e d_8 . Note que o valor da distância para os vizinhos diretos (em d_4) e diretos e indiretos (em d_8), são iguais a 1.

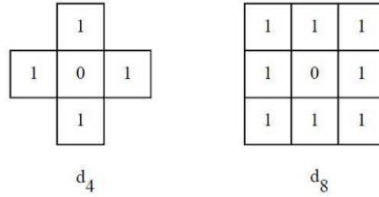


Figura 93 Máscaras de chanfro associadas às métricas d_4 e d_8
(Fernandes 2002)

As máscaras podem assumir valores crescentes de raio r , formando, assim, as bolas (elementos estruturantes) no domínio discreto. Exemplos de bolas, com raio igual a 2, e suas respectivas métricas, são apresentadas na Figura 94.

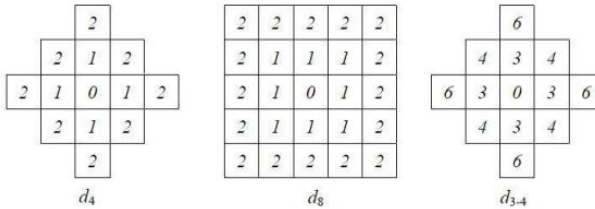


Figura 94 Bolas de raio $r = 2$ para diferentes métricas, no domínio bidimensional (Fernandes 2002)

Os quadradinhos representam os pixels, e a numeração, que compõem tanto as máscaras quanto as bolas, indica a distância até o pixel de referência definido, a priori, de 0 (zero). Uma ponderação bastante utilizada, se faz com relação aos valores de 3 e 4 para vizinhos diretos e indiretos, respectivamente, de onde vem a aproximação: $(1, \sqrt{2}) \rightarrow (1, 4/3)$. Esta aproximação dá origem à métrica d_{3-4} , que é a métrica mais próxima das distâncias da métrica euclidiana (Fernandes 2002). Com o crescimento do raio, o comportamento das bolas geradas para as métricas d_4 , d_8 e d_{3-4} assume as formas da Figura 95.

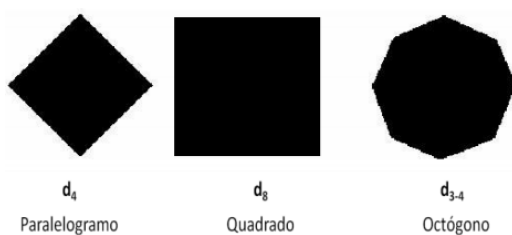


Figura 95 Formato que as bolas adquirem para um raio grande (Fernandes 2002)

O mesmo princípio demonstrado em duas dimensões pode ser aplicado em três, basta imaginar volumes ao invés de planos. A métrica d_{3-4-5} é o equivalente tridimensional da métrica d_{3-4} . As bolas de raios $r = 1, 2$ e 3 , da métrica d_{3-4-5} , no domínio tridimensional, são ilustradas na Figura 96

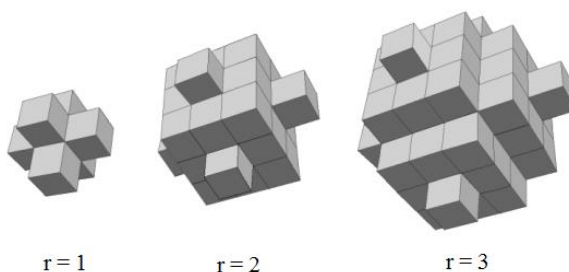


Figura 96 Bolas de raio $r = 1, 2$ e 3 , para a métrica d_{3-4-5} , no domínio tridimensional (Moreira 2013).

As métricas que definem o elemento estruturante são a base para uma infinidade de ferramentas de processamento e análise de imagens, como as operações morfológicas.

Operação de Abertura Erosão e dilatação são as operações básicas da morfologia matemática. São operações utilizadas em alguns filtros e em diversas quantificações de fases. Para definir uma operação de erosão, considere um objeto qualquer, contido no espaço R^2 , e B um elemento estruturante de formato circular, por exemplo. Pode-se definir o resultado da erosão de X por B , como sendo:

$$E^B(X) = \{x \in R^2; B_x \subset X\} \quad A.1$$

Onde B_x denota o centro do elemento estruturante em cada ponto x . Desta forma, para cada posição x , em R^2 , o centro do elemento estruturante é inserido, e são considerados, pertencentes ao objeto erodido, os pontos, tais que, esteja totalmente contido em.

A Figura 97 ilustra como ocorre a erosão, o pixel central do elemento estruturante é conservado na imagem resultante [Fernandes, 2002]. Note que os objetos menores que o elemento estruturante desaparecem por completo.

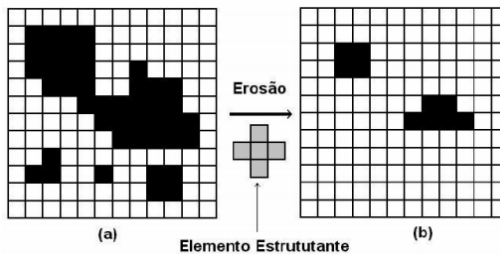


Figura 97 Princípio da operação de erosão. a) Imagem original X e, b) o seu respectivo erodido $E^B(X)$. Detalhe do elemento estruturante (Fernandes 2002)

De maneira semelhante à operação de erosão, a dilatação também varre toda a imagem com o elemento estruturante. Onde, o resultado da dilatação de X por B , é definido por

$$D^B(X) = \{x \in R^2; B_x \cap X \neq \emptyset\} \quad A.2$$

Neste caso, o objeto dilatado consiste no conjunto de pontos x , tais que, o centro do elemento estruturante, inserido em x , tem uma intersecção não nula com X . Em outras palavras, quando o pixel central tem uma intersecção não nula com o objeto, todos os pixels, relativos ao elemento estruturante, passam a pertencer ao objeto, dilatando-o. Esta operação é ilustrada na Figura 98.

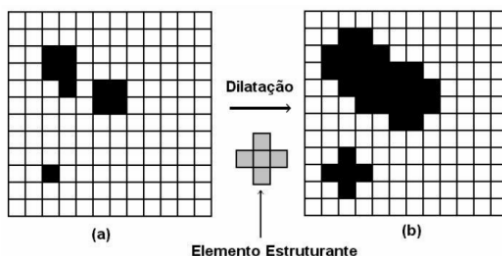


Figura 98 Esquema ilustrativo da operação de dilatação. a) Imagem original X e, b) o seu respectivo dilatado $D^B(X)$. Detalhe do elemento estruturante [Fernandes, 2002].

A partir da combinação das operações de erosão e dilatação, são definidas as operações de abertura e fechamento. A operação de abertura é a combinação de uma operação de erosão seguida por uma dilatação, e fechamento é uma dilatação seguida de uma erosão. Apesar de se trabalhar com a combinação de operações opostas (erosão e dilatação), estas não são comutativas. O resultado de uma abertura depende da imagem inicial, mas pode ser uma imagem com uma borda mais lisa, eliminação de ruído ou pequenos defeitos, ou o aumento (abertura) de espaços vazios. Após os dois passos de erosão e dilatação, com o mesmo elemento estruturante, obtém-se uma imagem resultante da operação de abertura. Um exemplo básico dos passos desta operação é apresentado na Figura 99.

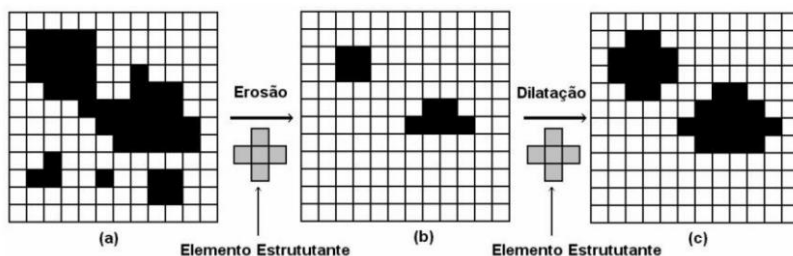


Figura 99 Representação das duas operações morfológicas que resultam na operação de abertura (Fernandes 2002).

As operações fundamentais da morfologia matemática, a erosão e a dilatação, são a base para uma infinidade de ferramentas de processamento e análise de imagens. Como a demonstrada aqui por

operação de abertura, e por algumas técnicas de segmentação e reconhecimento de padrões.

